



**Gil Marques  
Loureiro Silva**

**Seguimento de trajectórias e desvio de obstáculos  
com visão e laser para ROV**

**Path following and obstacle avoidance with vision  
and laser for ROV**





**Gil Marques  
Loureiro Silva**

**Seguimento de trajectórias e desvio de obstáculos  
com visão e laser para ROV**

**Path following and obstacle avoidance with vision  
and laser for ROV**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Computadores e Telemática, realizada sob a orientação científica do Doutor José Nuno Panelas Nunes Lau, Professor Auxiliar do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro e do Doutor Paulo Artur Pinto de Oliveira Lopes, Professor Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro. Teve ainda a colaboração do Doutor Francisco José Curado Mendes Teixeira, Investigador do Departamento de Eletrónica e Telecomunicações da Universidade de Aveiro.



Dedico este trabalho à minha família, amigos e namorada pelo incansável apoio durante este período tão importante na minha vida.



**o júri / the jury**

presidente / president

Prof. Doutor Joaquim João Estrela Ribeiro Silvestre Madeira  
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

vogais / examiners committee

Prof. Doutor António Pedro Rodrigues Aguiar  
Professor Associado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Doutor Paulo Artur Pinto de Oliveira Lopes  
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro





## **agradecimentos / acknowledgements**

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador Prof. Nuno Lau por me possibilitar a realização desta dissertação e por todo o acompanhamento ao longo da realização da mesma.

Quero ainda agradecer ao Prof. Francisco Curado por estar sempre disponível, pelo apoio prestado e pelas inúmeras deslocações à Universidade de Aveiro para acompanhar o meu projecto.

Um agradecimento especial ao meu co-orientador, Prof. Paulo Lopes que me acompanhou regularmente ao longo do projecto e me deu todas as ferramentas necessárias para a execução do mesmo, assim como todo o apoio e disponibilidade possíveis.

Agradeço também ao clube Os Galitos pela disponibilização das suas instalações que permitiram realizar os testes na água no decorrer do projecto. Por último, agradeço à comunidade do Matlab que partilhou algoritmos e tutoriais essenciais para a realização deste projecto.



## Palavras Chave

ROV, veículo autónomo, calibração da câmara, visão com laser, detecção de obstáculos

## Resumo

O veículo submarino operado remotamente (na sigla em inglês - ROV) tem sido usado em actividades subaquáticas ao longo dos anos. As suas aplicações podem variar desde o uso para actividades de lazer até operações militares ou investigação científica. Existe um grande potencial na automação de tarefas repetitivas, por exemplo, conduzir o ROV ao destino onde vai operar. O desenvolvimento de um sistema que automatize este processo é um bom ponto de partida para diminuir o controlo por parte do operador humano numa tarefa recorrente.

Assim, o objectivo principal desta dissertação passa pelo desenvolvimento de um sistema de navegação que permita ao ROV VideoRay Pro 4 navegar até um determinado destino e encontrar um método de evitar obstáculos que possam surgir no seu caminho. Pretende-se encontrar uma solução de baixo custo que permita criar um sistema simples e funcional, para que este possa ser aplicado a qualquer ROV deste tipo.

Para a parte da navegação foi desenvolvido um sistema que faz uso do magnetómetro existente no ROV. Este permite a navegação assistida e ainda a execução de percursos pré-definidos. Foram implementados dois percursos: o seguimento de uma trajectória rectilínea, seguindo a orientação inicial; o seguimento de uma trajectória rectangular, voltando ao ponto inicial. Durante a execução dos percursos mencionados anteriormente é possível detectar e evitar obstáculos.

Para a detecção de obstáculos, o sistema baseia-se na visão computacional sendo a câmara do ROV o instrumento principal, auxiliado por um laser acoplado, que projecta uma linha laser no obstáculo permitindo calcular a distância ao mesmo. A utilização da câmara tem várias vantagens dado que é um sensor comum a quase todos os ROVs, tem um custo baixo e existe muita documentação no campo da visão computacional. Estas implementações introduzem três desafios principais: (i) calibração da câmara (ii) calibração do laser e (iii) automação da navegação do veículo.

O sistema foi validado numa piscina de um clube de natação, onde foram testadas várias manobras, assim como a detecção e desvio de obstáculos. Os resultados obtidos foram satisfatórios, mostrando um bom desempenho do veículo na correcção de desvios ao longo dos percursos pré-definidos e também na detecção de obstáculos, ainda que com algum atraso no tempo de resposta.



**Keywords**

ROV, autonomous vehicle, camera calibration, laser based vision, obstacle detection

**Abstract**

Over the years, remotely operated vehicles (ROVs) have been used in underwater activities and their applications range from leisure use to military operations or scientific research. There is a great potential for automation of recurring tasks, for instance, leading the ROV to the destination where it will operate. Developing a system that automates this process is a good starting point for reducing the control by the human operator in a recurring task.

The main goal of this thesis is to develop a navigation system that allows ROV VideoRay Pro 4 to navigate to a specific destination and find a method to avoid obstacles that may arise in its path. It also aims to find a low-cost solution that allows to create a simple and functional system, so that it can be applied to any ROV of this type.

For the navigation part, the system that was developed makes use of the existing ROV magnetometer. This allows both assisted navigation and the execution of pre-defined routes. Two routes were implemented: a straight line, following the initial orientation; and a rectangular route, returning to the initial point. During the execution of both those routes it is possible to detect and avoid obstacles.

To detect obstacles, the system is based on the computer vision being the ROV camera the main instrument, and aided by a laser attached that projects a laser line to the obstacle thus allowing to calculate the distance to it. The use of the camera has several advantages since it is a sensor used by almost all ROVs, it has a low cost and there is significant literature in the field of computer vision. These implementations have three main challenges: (i) camera calibration (ii) laser calibration and (iii) vehicle navigation automation.

The system was validated in a pool of a swimming club, where several manoeuvres were tested, as well as the detection and diversion of obstacles. The results were satisfactory, showing a good performance of the vehicle in correcting the deviations along the pre-defined routes and in detecting obstacles, although with some delay in the response time.



# CONTEÚDO

---

LISTA DE FIGURAS . . . . .	iii
LISTA DE TABELAS . . . . .	v
LISTA DE ACRÓNIMOS . . . . .	vii
1 INTRODUÇÃO . . . . .	1
1.1 Âmbito da dissertação . . . . .	1
1.2 Enquadramento e motivação . . . . .	2
1.3 VideoRay Pro 4 . . . . .	2
1.4 Descrição do ROV e equipamento . . . . .	4
1.5 Cenários de operação . . . . .	4
1.6 Objectivos . . . . .	5
1.7 Estrutura da Dissertação . . . . .	6
2 TECNOLOGIAS EXISTENTES . . . . .	7
2.1 Veículos subaquáticos . . . . .	7
2.2 Sistemas de Navegação . . . . .	8
2.3 Sensoriamento de um veículo subaquático . . . . .	11
2.4 Visão Computacional . . . . .	13
2.4.1 Métodos de calibração para sistemas de visão computacional . . . . .	13
2.4.2 Emissores laser . . . . .	15
2.5 Resumo do capítulo . . . . .	17
3 PERCEPÇÃO E NAVEGAÇÃO COM ROV . . . . .	19
3.1 Diagrama do sistema . . . . .	19
3.2 Configuração de controlos autónomos . . . . .	20
3.3 Processo de calibração da câmara do ROV . . . . .	23
3.4 Sistema de visão laser . . . . .	27
3.5 Desvio de obstáculos . . . . .	33
3.6 Resumo do capítulo . . . . .	34
4 RESULTADOS . . . . .	35
4.1 Detecção e desvio de obstáculos . . . . .	36
4.2 Sistema de navegação . . . . .	40
4.3 Outros cenários de aplicação . . . . .	42
4.4 Resumo do capítulo . . . . .	43

5	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO . . . . .	45
5.1	Conclusões . . . . .	45
5.2	Trabalho futuro . . . . .	46
	BIBLIOGRAFIA . . . . .	47



# LISTA DE FIGURAS

---

1.1	Graus de liberdade do veículo. . . . .	3
1.2	VideoRay Pro 4. . . . .	3
1.3	VideoRay Pro 4 em trabalho de inspecção. . . . .	5
2.1	ROV e AUV. . . . .	8
2.2	Sistema de condução em ciclo fechado. . . . .	9
2.3	Sistema de condução em ciclo aberto e de controlo em ciclo fechado. . . . .	10
2.4	Ilustração de sonar acústico em ROVs e AUVs . . . . .	12
2.5	Imagem do padrão utilizado na calibração da câmara. . . . .	14
2.6	Esquema do sensor do lado esquerdo e fotografia do lado direito. . . . .	16
2.7	Esquema de câmara e lasers. . . . .	16
3.1	Diagrama do sistema. . . . .	20
3.2	Botões de controlo do ROV . . . . .	20
3.3	Ilustração do percurso de navegação em quadrado. . . . .	22
3.4	Motores traseiros. . . . .	23
3.5	Passos de calibração. . . . .	23
3.6	Toolbox de calibração do Matlab. . . . .	24
3.7	Matriz intrínseca. . . . .	25
3.8	Gráfico de projecção de erro. . . . .	26
3.9	Imagem inadequada para calibração. . . . .	26
3.10	Diagrama de projecção do laser num obstáculo. . . . .	28
3.11	Projecção do laser num obstáculo. . . . .	28
3.12	Etapas de processamento de imagem em Matlab. . . . .	29
3.13	Ilustração do percurso de desvio de um obstáculo. . . . .	33
4.1	Local de testes. . . . .	35
4.2	Imagem original. . . . .	36
4.3	Imagem calibrada. . . . .	36
4.4	Laser a incidir num obstáculo. . . . .	37
4.5	Camadas de cor da imagem. . . . .	37
4.6	Imagem após filtro de cor. . . . .	37
4.7	Gráfico de distância em função do pixel de incidência. . . . .	38
4.8	Laser a incidir num obstáculo, debaixo de água. . . . .	39
4.9	Orientação do veículo no percurso constante. . . . .	41
4.10	Gráfico da orientação na realização do percurso com mudança de direcção. . . . .	42



# LISTA DE TABELAS

---

1.1	Características do VideoRay Pro 4. . . . .	4
3.1	Controlos programados do Remotely Operated Vehicle (ROV). . . . .	21
3.2	Parâmetros da câmara. . . . .	27
4.1	Distância vs Posição. . . . .	38
4.2	Amostra de valores de heading. . . . .	40



# LISTA DE ACRÓNIMOS

---

<b>AUV</b>	Autonomous Underwater Vehicle
<b>GNC</b>	Guidance, navigation, and control
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>HSV</b>	Hue, Saturation, Lightness
<b>LED</b>	Light Emitting Diode
<b>LRF</b>	Laser Rangefinder
<b>MATLAB</b>	MATrix LABoratory
<b>MCS</b>	Motion Control System
<b>PNG</b>	Portable Network Graphics
<b>RGB</b>	Red, Green, Blue
<b>ROV</b>	Remotely Operated Vehicle
<b>SBL</b>	Short Baseline
<b>USBL</b>	Ultra-short Baseline
<b>VAC</b>	Voltage Alternating Current
<b>VDC</b>	Voltage Direct Current



# INTRODUÇÃO

---

## 1.1 ÂMBITO DA DISSERTAÇÃO

Embora o oceano cubra mais de dois terços do nosso planeta, este ainda não foi devidamente explorado e existe uma necessidade crescente de descobrir este ambiente. Actualmente, o veículo robótico mais comum usado para explorar o mundo subaquático é o *Autonomous Underwater Vehicle (AUV)*.

A exploração de ambientes subaquáticos, com recurso a estes veículos, tem aumentado ao longo dos últimos anos, particularmente em actividades de investigação como a detecção e mapeamento de destroços de navios e rochas, e também em actividades comerciais ligadas à indústria do gás e do petróleo. Este tipo de actividades, utilizando veículos automatizados, necessita de sistemas de visão computacional com capacidade de detecção de obstáculos e anomalias. A informação visual é também utilizada com o intuito de facilitar a navegação autónoma ou operada remotamente deste tipo de veículos. As características do ambiente subaquático representam um conjunto de problemas no desenvolvimento de sistemas de navegação.

Esta dissertação aborda a navegação em ambientes estruturados com um Remotely Operated Vehicle (ROV), sendo utilizado o modelo VideoRay Pro 4, fabricado pela empresa americana VideoRay LLC. As principais funcionalidades que se pretendem desenvolver são a navegação com percursos pré-definidos e a detecção e desvio de obstáculos.

Existe um potencial enorme em tarefas repetitivas que podem ser automatizadas, por exemplo, fazer com o que o ROV chegue ao local onde vai operar. Desenvolver um sistema que automatize este processo é um bom ponto de partida. Dado que os ROVs são operados por pessoas, o propósito desta dissertação é desenvolver um sistema que permita ao ROV seguir trajectórias previamente definidas e evitar obstáculos que possam estar presentes debaixo de água.

## 1.2 ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO

Com uma zona económica exclusiva cerca de dezoito vezes maior do que a área terrestre, a área marítima de Portugal é uma das maiores da Europa [1]. Existe uma urgência na exploração da imensa área inexplorada, pelo que os ROVs e os AUVs têm um papel fundamental para a obtenção de resultados positivos. O problema na utilização deste tipo de veículos em ambientes subaquáticos hostis é a navegação. No caso dos ROV de inspecção, como aquele que é utilizado neste projecto, esta dificuldade deve-se ao facto do operador se basear na visão para efectuar o controlo do veículo e esta ser facilmente afectada pela falta de visibilidade debaixo de água.

Assim sendo, o problema inerente a esta dissertação, surgiu da necessidade de criar um sistema de navegação que permitisse ao ROV ter alguma autonomia para navegar de forma mais segura, detectando e desviando-se de obstáculos que se encontrem no seu percurso.

No caso do sistema de navegação, o objectivo passa por implementar um software que permita não só o controlo remoto do veículo, semelhante ao que é possível realizar com o *cockpit* – software oficial da VideoRay - mas também programar trajectórias pré-definidas, para que numa primeira fase o ROV seja semiautónomo. Posteriormente, o objectivo será combinar a visão computacional com o sistema de navegação, para que o ROV seja capaz de detectar obstáculos e calcular distâncias a determinados alvos.

## 1.3 VIDEORAY PRO 4

O ROV é um veículo subaquático controlado remotamente que está ligado a um dispositivo na superfície, através de um cabo umbilical, que fornece energia, transmite comandos, recebe dados sensoriais e sinais de controlo entre o operador e o ROV. Este cabo representa uma das principais diferenças entre AUVs e ROVs em termos funcionais. Outra diferença é que enquanto os ROVs são controlados remotamente por um operador em terra, os AUVs são largados no oceano e navegam autonomamente, sendo posteriormente recolhidos pelos investigadores numa posição pré-estabelecida. De acordo com alguns autores, o *Cutlet* - propriedade da Marinha Real Britânica - construído nos anos 50, foi o primeiro ROV a ser desenvolvido [2], mas apenas nos anos 80 apareceram os primeiros ROVs comerciais, principalmente devido às indústrias do petróleo e gás [3].

O VideoRay Pro 4 é um pequeno ROV de observação, que incorpora um design e uma tecnologia que faz com que seja um dos ROVs mais avançados, potentes e versáteis existentes no mercado, nesta gama de veículos [4]. O veículo está equipado com dois propulsores na parte traseira, horizontais, e um vertical, na parte superior. Estes propulsores possibilitam ao ROV deslocar-se em seis graus de liberdade, três de movimento - *surge*, *sway* e *heave* - e três de rotação - *roll*, *pitch* e *yaw*, como pode ser observado na Figura 1.1.



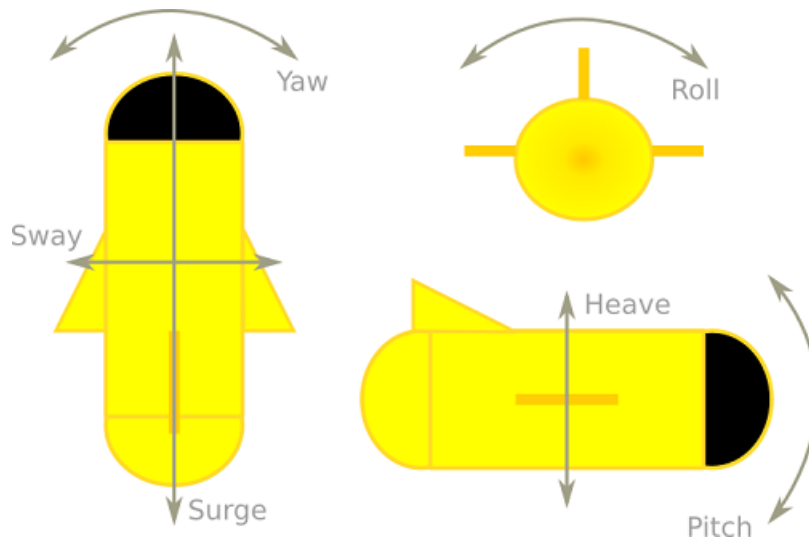


Figura 1.1: Graus de liberdade do veículo.<sup>1</sup>.

O veículo pesa 6,1kg, com os componentes base, sendo possível adicionar novos acessórios como câmaras, sonares e uma garra robótica. É importante referir que o peso da embarcação pode ser alterado manualmente, ajustando o peso do lastro, com pequenas peças de chumbo, na parte de baixo do mesmo, alterando assim as suas propriedades de flutuabilidade. O ROV foi comprado à companhia VideoRay para fins de investigação. Na Figura 1.2 podemos observar o veículo utilizado nos testes, propriedade do Instituto de Electrónica e Engenharia Informática de Aveiro (IEETA).



Figura 1.2: VideoRay Pro 4.

<sup>1</sup><https://thecontinuum.com/2012/09/24/arduino-imu-pitch-roll-from-accelerometer/>,  
acedido em 05/06/2018

## 1.4 DESCRIÇÃO DO ROV E EQUIPAMENTO

A tabela 1.1 mostra as especificações do VideoRay Pro 4 e sintetiza algumas das propriedades principais ao nível do hardware existente. Nem toda a documentação sobre o ROV está disponível, por exemplo, a informação sobre a tecnologia usada no sensor e nos propulsores não é fornecida pelo fabricante.

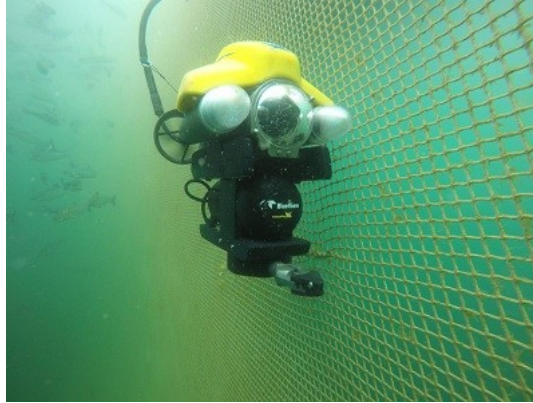
*Tabela 1.1: Características do VideoRay Pro 4.*

Dimensões ( L x C x H )	37,5 x 28,9 x 22,3 cm
Peso	6,1 Kg
Profundidade máxima	305 m
Potência de entrada	100-240 VAC
Propulsores	Horizontal 2 x 12 VDC / 200W / 17A Vertical 1 x 12 VDC / 200W / 17A
Velocidade	Horizontal: 4 nós (7,41km/h)
Câmara principal	570 linhas, 0,004 lux
Luzes	2 x Arrays de LED otimizados 3,600 lumens

## 1.5 CENÁRIOS DE OPERAÇÃO

No que diz respeito aos cenários de operação, os objectivos passam pela utilização do sistema de navegação em ambientes estruturados com fraca visibilidade, onde os sistemas de visão nem sempre são eficazes, devido às características próprias do meio. As áreas em que o veículo pode ser utilizado são vastas, sendo que algumas possíveis utilizações para este tipo de sistema são:

- Exploração de navios e outros veículos naufragados;
- Inspeção de plataformas de extracção de petróleo e gás natural;
- Inspeção de diques e barragens;
- Exploração de eco-sistemas a grandes profundidades;
- Mapeamento de minas inundadas;
- Mapeamento do terreno oceanográfico.



*Figura 1.3: VideoRay Pro 4 em trabalho de inspecção<sup>2</sup>.*

## 1.6 OBJECTIVOS

O objectivo principal da dissertação é contribuir para o desenvolvimento dos sistemas de navegação subaquática, dado que é uma área em constante crescimento. Assim sendo os objectivos que se pretendem atingir com a realização deste projecto podem ser enumerados nos seguintes pontos:

- Estabelecimento da comunicação com o ROV para leitura de sensores e envio de comandos;
- Desenvolvimento de um procedimento de calibração para a câmara do ROV;
- Optimização do processo de calibração através da gravação de parâmetros;
- Detecção de obstáculos com recurso a um laser;
- Identificação de pontos de interesse ao longo de uma sequência de imagens/vídeo;
- Desenvolvimento de um algoritmo de navegação autónoma;
- Realizar uma missão com o ROV para testar o seu comportamento em condições reais.

---

<sup>2</sup><http://www.atlantasmarine.com/news/videoray-pro-4-alantas-marine-fish-farm-trials>,  
acedido em 95/06/2018

## 1.7 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta Dissertação está dividida em cinco capítulos dos quais, o capítulo 1, a Introdução, já foi apresentada. O restante documento está estruturado da seguinte forma:

**Capítulo 2:** Contextualização sobre a temática em questão. Descrição das tecnologias existentes, dos métodos e avanços no campo da navegação para ROVs e dos sistemas de calibração na visão computacional.

**Capítulo 3:** Descrição da implementação do projecto, onde é apresentada a arquitectura do sistema criado, assim como a configuração de controlos de navegação e o processo de calibração e visão com laser. São também apresentados os programas de software executados, assim como as etapas de análise de imagem em MATrix LABoratory (MATLAB).

**Capítulo 4:** Discussão de resultados dos testes de navegação realizados em ambiente subaquático, na navegação em percursos pré-definidos e na detecção e desvio de obstáculos.

**Capítulo 5:** Neste último capítulo é apresentada uma conclusão de todo o trabalho desenvolvido, assim como uma apreciação geral do mesmo. Além disso, são apresentadas sugestões de trabalho futuro para dar continuidade a este projecto.

## CAPÍTULO 2

# TECNOLOGIAS EXISTENTES

---

Este capítulo é dedicado à revisão da literatura e das pesquisas recentes no campo dos sistemas de controlo, navegação e de seguimento de trajectória com desvio de obstáculos para veículos controlados remotamente, mais especificamente, relacionado com o ROV VideoRay Pro 4. O foco não será o estudo completo do sistema de controlo de veículos subaquáticos, que consiste em sistemas de energia e electrónica, controlo de motores, e outros. Assim, o foco principal é dado às partes do sistema que lidam directamente com o controlo do veículo e que satisfazem os objectivos principais.

Os tópicos principais abordados na revisão da literatura são o sistema de navegação, com especial detalhe no sistema de condução, detecção de obstáculos com recurso a triangulação laser e a calibração da câmara, que será importante para o tópico anterior.

## 2.1 VEÍCULOS SUBAQUÁTICOS

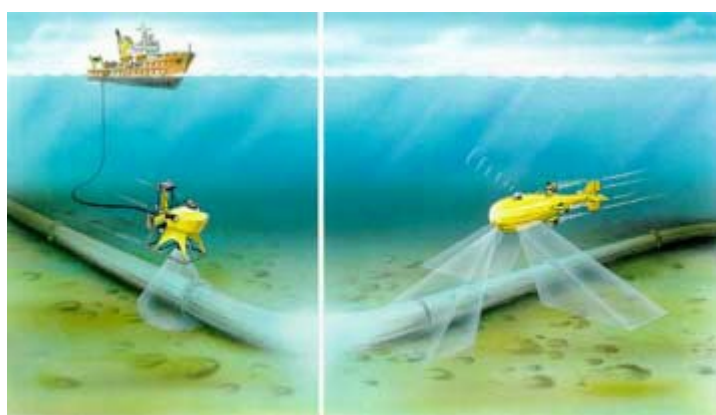
O ambiente subaquático pode ser um meio perigoso e a limitação dos mergulhadores devido à elevada pressão da água existente a maiores profundidades, faz com que a procura de soluções com veículos subaquáticos robotizados, tais como os ROVs e AUVs, capazes de atingir profundidades elevadas, aumente rapidamente.

Tradicionalmente, os ROVs têm sido adoptados como a ferramenta primária na exploração científica, inspecção, procura e salvamento debaixo de água[5]. Apesar destes veículos serem úteis em certas tarefas, continuam a requerer intervenção humana para uma orientação geral do veículo. Os ROVs ainda não conseguem recrear a capacidade sensorial de um submarino de investigação tripulado. A segurança e o custo financeiro, aliados à vontade de observar o ambiente a maiores profundidades levou a um aumento na investigação e desenvolvimento de robôs subaquáticos que introduzem tecnologias de navegação autónoma.

Os AUVs, à semelhança dos ROVs, navegam debaixo de água usando um sistema de propulsores, sendo que uma das diferenças entre eles reside no facto de o AUV ser controlado e guiado por um computador integrado, fazendo uso dos seus sensores para extrair informação do ambiente que o rodeia. Deste modo, estes veículos não necessitam de nenhum apoio exterior, nem de intervenção humana para

tomar decisões na sua navegação. Por outro lado, o ROV necessita de ser controlado por um operador humano e está ligado por um cabo ao controlador em terra, o que limita as movimentações do mesmo debaixo de água.

Os ROVs podem ser utilizados em vários cenários, com a vantagem de garantir a segurança das pessoas em actividades subaquáticas e de reduzir os custos normalmente associados a essas operações. Dentro das várias aplicações deste sistema destacam-se: a inspecção de embarcações, plataformas e outras estruturas debaixo de água; o uso para fins militares, principalmente para detectar e desactivar minas subaquáticas; a exploração do oceano para fins de investigação científica, na descoberta e estudo de várias espécies e habitats. Já as capacidades dos AUVs são essenciais para tarefas como a exploração de zonas geológicas, catalogação de recifes e no estudo de criaturas marinhas, assim como para inspecionar tubos, cabos e assistir os mergulhadores e operadores dos ROVs [6][7].



*Figura 2.1: Ilustração de um ROV controlado e alimentado desde a superfície (do lado esquerdo) e um AUV (do lado direito) a inspecionar tubos no fundo do oceano<sup>1</sup>.*

## 2.2 SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO

O primeiro sistema de navegação automático para controlar embarcações foi desenvolvido há mais de 100 anos, em 1911, por Elmer Sperry. Este incorporou o controlador proporcional integral (PI) e o ajuste automático de ganho para compensar as perturbações causadas pelas condições do mar [8]. O interesse nos sistemas de navegação para os veículos subaquáticos tem crescido nos últimos anos, dado que este tipo de veículos pode realizar um maior número de variedade de tarefas. Entre outras, estas tarefas envolvem o seguimento de trajetórias, posicionamento dinâmico e realização automática de pequenas missões, tais como mapear o fundo do mar e estimar posições. Um dos subsistemas que representa uma grande parte do sistema de controlo de veículos marítimos é o sistema de controlo de movimento (Motion Control System (MCS)). Estes sistemas podem variar em termos de complexidade e de precisão, dependendo das propriedades dinâmicas e do meio em que se deseja operar o veículo.

---

<sup>1</sup><http://www.ogniwa-paliwowe.info/Article4.php>, acedido em 05/06/2018

## Condução, navegação e controlo

De acordo com T. Fossen [9], o MCS de uma embarcação é responsável por lidar com as propriedades relacionadas com a deslocação da mesma. Isto inclui calcular as forças que actuam sobre o veículo e envolve processar toda a informação requerida para satisfazer um determinado objectivo. Estes objectivos são, por exemplo, manter-se ou navegar para uma determinada posição com uma rota pré-definida. Para ser possível desenvolver este tipo de sistema é conveniente que este seja dividido em três partes separadas.

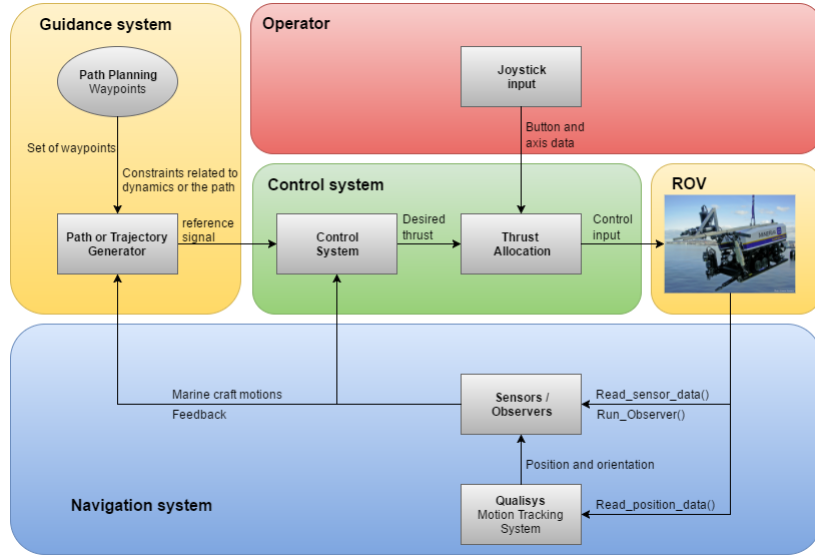


Figura 2.2: Sistema de condução em ciclo fechado [9].

Os três subsistemas que fazem parte do sistema de controlo de movimento são conhecidos por condução, navegação e controlo e eles são tipicamente referidos como sistema Guidance, navigation, and control (GNC). Estes módulos comunicam através de transmissão de dados, como ilustrado na Figura 2.2, representado um fluxo de transmissão de dados típico para um ROV equipado com detecção de trajectória.

A. Lekkas [10] explica que é vantajoso adoptar uma abordagem modular e olhar para o sistema GNC como três módulos que constituem o sistema de controlo de movimento. Um módulo de planeamento de trajectória deve fazer parte deste sistema, porque todos os módulos interagem entre si e nenhum deles é completamente independente. Obviamente, isto poderá ser difícil de evitar à medida que os sistemas robóticos se tornem mais complexos e condensados. O módulo de planeamento de trajectória ou de movimento [11] é responsável por planear um caminho com um sistema de condução [10]. Com o crescimento ao nível da autonomia em sistemas robóticos, é natural que o planeamento de trajectórias seja realizado de forma autónoma e directa pela embarcação. Fornecendo ao sistema um caminho pré-definido é raro este incluir informação actualizada sobre o ambiente envolvente. Isto continua a ser um grande desafio, dado que implementar um sistema autónomo e com inteligência artificial que possa tomar decisões em tempo-real, em sistemas robóticos, é muito difícil [12].

Em seguida, será apresentada uma descrição dos sistemas de condução, navegação e controlo, baseados no trabalho de T. Fossen [9]. Depois será dado destaque ao planeamento de trajectórias, onde será tido em conta o trabalho apresentado por A. Lekkas [10].

**Sistema de navegação:** O sistema de navegação é composto por sensores que medem o estado do sistema, isto é, a distância percorrida, posição, velocidade, entre outros. No caso de não haver sensores disponíveis, seja devido ao elevado custo ou por não existir um determinado estado, observadores são usados para estimar os dados pretendidos. Observadores são sistemas computadorizados que usam um modelo do veículo para estimar o estado do mesmo [13]. Frequentemente, observadores e sensores são usados em conjunto, dando maior precisão nos resultados obtidos. Os sistemas de navegação podem, por exemplo, permitir-nos saber a posição do veículo dentro de um intervalo de referência, informação essa que pode ser muito relevante.

**Sistema de condução:** O sistema de condução cria um sinal de referência para o sistema de controlo através da obtenção de informações do módulo de planeamento de trajectórias e do *feedback* do sistema de navegação. Estes sistemas pretendem criar trajectórias óptimas, evitando obstáculos ao longo do caminho e podem também incluir outras especificações. Essas especificações podem ser, por exemplo, minimizar o consumo de combustível/bateria ou tempo de uso, alterar o caminho pré-definido em caso de mau tempo ou de outro factor externo inesperado.

Além disso, os sistemas de condução podem ser classificados em sistemas de ciclo fechado ou ciclo aberto [9]. Se a informação do sensor e as estimativas do observador estão disponíveis através de *feedback* para o sistema de condução, este sistema diz-se de ciclo fechado. Estes sistemas têm um desempenho melhor do que o seu opositor, dado que a informação recebida pode ser usada para atingir o resultado esperado mais rapidamente. Se o sistema não tem um mecanismo de resposta, este é classificado como sistema de ciclo aberto. Isto significa que ele já conhece ou estimou a informação sobre o ambiente e responde através de técnicas para compensação automática e dinâmica. Na Figura 2.2 é mostrado um sistema de ciclo fechado com resposta, enquanto na Figura 2.3 é mostrado um sistema de ciclo aberto onde é usada informação sobre o vento e a maré para controlar o sistema.

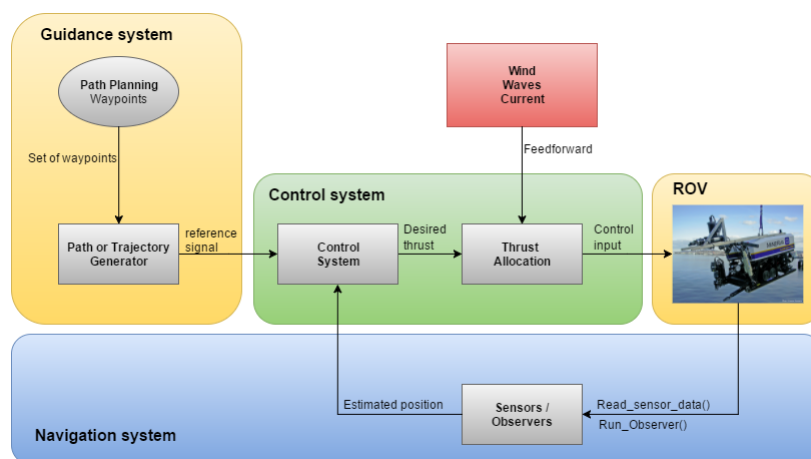


Figura 2.3: Sistema de condução em ciclo aberto e de controlo em ciclo fechado [9].

**Sistema de controlo:** O sistema de controlo refere-se a um sistema controlado pelo computador, que tipicamente gere ou regula um ou mais dispositivos para atingir um comportamento desejado. Assim como os sistemas de condução, estes sistemas estão divididos em duas classes: ciclo aberto e ciclo fechado. Ambos os sistemas geram um resultado dependendo da informação recebida, mas os sistemas de ciclo fechado trocam informação num ciclo fechado para processar e corrigir resultados, ao contrário do ciclo aberto. Isto significa que o ciclo fechado necessita de resultados que possam ser medidos (ou



estimados). A maior parte dos sistemas tem sensores e/ou observadores, o que significa que a maior parte dos estados pode ser medida ou estimada com um erro não significativo. Isto encoraja o uso de sistemas de ciclo fechado.

## 2.3 SENSORIAMENTO DE UM VEÍCULO SUBAQUÁTICO

Além do sistema de controlo, outro aspecto importante é o método de sensoriamento, ou seja, o tipo de sensor utilizado para fornecer informações ao sistema de controlo, para assim garantir a trajectória ou o posicionamento do veículo num certo local [14].

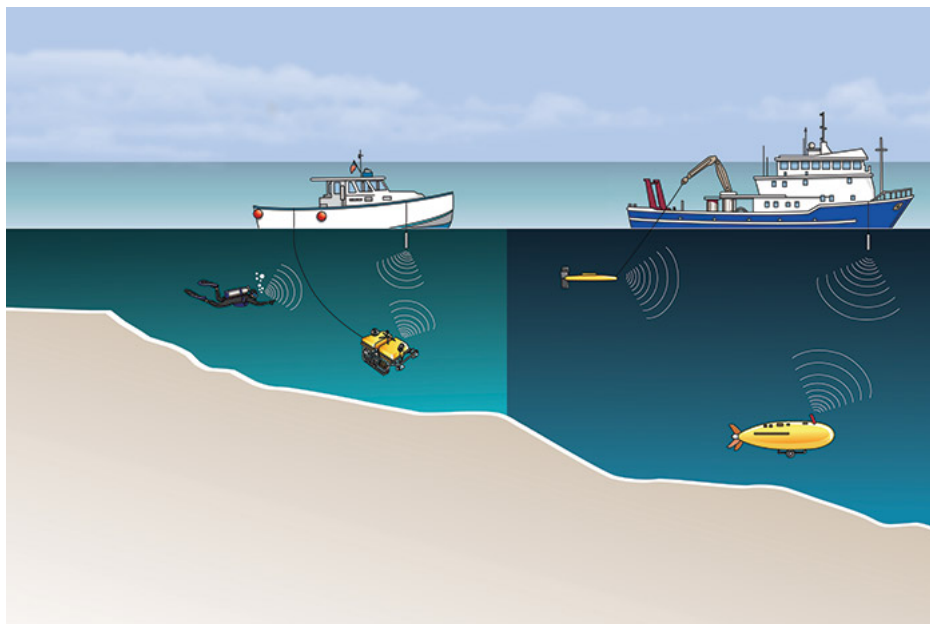
Os sensores, como a câmara de um robô, permitem ao mesmo tempo relacionar-se com o mundo físico, e guiar-se autonomamente, o que significa ser capaz de se adaptar às mudanças do ambiente em que se encontra. Num ambiente fechado, os sensores laser ou os sistemas de visão são usados para detectar sinais artificiais para o robô se localizar. No exterior, os veículos terrestres e aéreos podem usar o sistema de navegação Global Positioning System (GPS). Por outro lado, debaixo de água os sinais GPS não estão acessíveis directamente, pelo que os veículos subaquáticos têm de adoptar outro tipo de sensores para navegar e calcular a sua posição relativa [15].

Actualmente, os sensores mais usados em robôs subaquáticos são o registador da velocidade *Doppler*, a bússola e o giroscópio, aparelhos que permitem estimar a posição do veículo [16]. Apesar dos sonares serem boas soluções para seguir e detectar objectos debaixo de água, é difícil evitar problemas devido ao ruído acústico e ao efeito de caminhos múltiplos [17].

O posicionamento do veículo está dependente do tipo de sensores utilizados - estes instrumentos serão responsáveis por adquirir informações sobre o ambiente em redor, que serão usadas para o controlar. É necessário utilizar diferentes tipos de sensores, dependendo do tipo de missão que se pretende realizar. Os principais sensores aplicados no posicionamento de ROVs e outros veículos subaquáticos têm princípios baseados em ondas acústicas, sistemas inerciais e na visão [18].

Entre os sensores baseados em ondas acústicas, os mais utilizados são os sonares que emitem um sinal acústico potente e recebem as reflexões desse sinal, reflectidas nos objectos localizados ao redor, sendo assim possível determinar a direcção e a distância a que se encontram. Os sistemas mais populares são:

- Short Baseline (SBL): este sensor capta os sons emitidos por um conjunto de “faróis” acústicos instalados no fundo do mar e na embarcação de apoio, através de um receptor instalado no veículo. Assim, conhecendo a velocidade do som e usando as diferenças entre os instantes de tempo de chegada do sinal, é possível determinar a distância e a posição do veículo;
- Ultra-short Baseline (USBL): permite calcular a posição do veículo através de medições de diferença de fase, tendo um tempo de resposta menor do que o anterior. Além disso, em vez de ser utilizado um conjunto de faróis acústicos é utilizado apenas um no fundo do mar e outro na embarcação de apoio [19].



*Figura 2.4: Ilustração de sonar acústico em ROVs e AUVs<sup>2</sup>.*

Dos sensores baseados em sistemas inerciais os mais utilizados são o acelerómetro e o giroscópio. Os acelerómetros medem acelerações através de medidas de inércia de pequenas partículas móveis, e por integração, podem ser obtidas as velocidades lineares. Já os giroscópios têm sido aplicados em sistemas de navegação tanto para veículos subaquáticos como terrestres. Este permite medir as mudanças de orientação do veículo e as suas velocidades angulares [20].

Apesar da utilização de sensores inerciais e baseados em sinais acústicos em ROVs ser muito comum, existem algumas limitações que poderão ser significativas, dependendo do objectivo. Por exemplo, os sensores inerciais, quando utilizados em aplicações com baixa aceleração e velocidade, podem não conseguir obter medidas de forma muito precisa. Já os sensores baseados em ondas sonoras, como os sonares referidos anteriormente, podem apresentar dificuldades na interpretação dos sinais quando o veículo fica muito próximo do objecto pretendido, devido ao elevado número de problemas relacionados com a propagação de ondas sonoras, como a reflexão, refacção e absorção em superfícies porosas [21].

Uma solução com grande potencial para sensoramento neste tipo de veículos é a utilização da visão computacional. As informações obtidas através do processamento de imagens captadas podem auxiliar o operador no controlo do veículo, seja em percursos longos onde a fadiga pode afectar o operador, seja em locais apertados onde a perícia humana pode não ser suficiente. Além disso, os sistemas de visão computacional não são sensíveis ao tempo de duração da missão [22]. Apesar do potencial deste sensor, a sua principal limitação está relacionada com o campo de visão, dado que tem uma distância limitada devido às características da luz na água, dificultando a aquisição de imagens [23].

Para tentar minimizar a limitação do uso da visão computacional, Caccia [14] e Karras [24] propõem a utilização da visão combinando o uso de lasers, aumentando assim o alcance do campo de visão e capacitando o veículo de informações sobre a sua posição em relação a um objecto. Através desta

<sup>2</sup><https://www.edgetech.com/applications/offshore-auv-rov-sonar-systems/>, acedido em 05/06/2018

solução, o sistema torna-se activo, ou seja, não depende de sinais de outros mecanismos externos, tais como os sonares.

De seguida, serão abordados alguns métodos de sensoramento baseados em visão computacional com apenas uma câmara e também com o uso de lasers auxiliares para detetar obstáculos e medir distâncias em relação a um objecto.

## 2.4 VISÃO COMPUTACIONAL

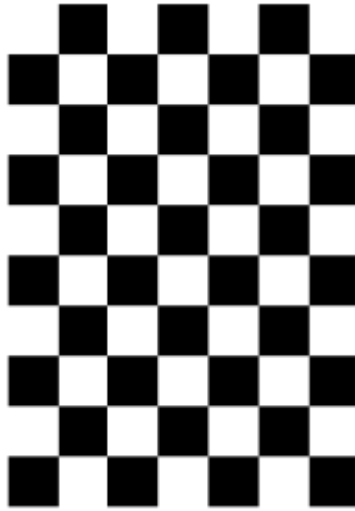
Na última década têm vindo a ser integrados sistemas de controlo baseados na visão o que veio despertar uma enorme atenção no campo da robótica subaquática. A visão é um sensor de alta resolução que fornece informação sobre o ambiente envolvente com uma grande precisão. Os sensores de visão são relativamente baratos e consomem pouca energia, e ainda assim são capazes de captar informação importante sobre o ambiente envolvente, tal como a cor, textura, formas, propriedades dinâmicas e geométricas [25]. A função principal de um sistema de visão é extrair informação de interesse de uma imagem e usá-la para guiar o veículo. Dado que um computador tem a capacidade de processar múltiplos *frames* ao mesmo tempo, o objectivo é processar imagens em tempo real.

### 2.4.1 MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO PARA SISTEMAS DE VISÃO COMPUTACIONAL

A calibração de um sistema de visão computacional é fundamental na realização de processamento de imagens e a exactidão do processo influencia directamente os resultados obtidos na execução de tarefas como a detecção de objectos e cálculo de distâncias. Dada a sua elevada relevância, nas últimas décadas, têm sido feitos grandes progressos no que respeita à melhoria da eficiência e qualidade dos processos de calibração. Seguidamente, serão apresentados alguns trabalhos cujo foco principal foi o aperfeiçoamento do processo de calibração do sistema óptico.

Z. Zhang [26] apresenta um método mais flexível para a calibração de câmaras. Este apenas requer por parte do sistema de visão, a observação de um padrão de calibração em, pelo menos, duas orientações diferentes e completamente desconhecidas. O princípio deste método consiste no uso de uma solução de fórmula fechada seguido de uma optimização não linear baseada no algoritmo de Maximum Likelihood Estimation (MLE) [27].

Após obter as imagens do padrão de várias perspectivas, como mostra o exemplo da Figura 2.5, são detectados os pontos de interesse, os cantos do padrão. Esses pontos permitem calcular várias características internas da câmara, tais como a distância focal, o centro óptico e o coeficiente de distorção das lentes.



*Figura 2.5: Imagem do padrão utilizado na calibração da câmara.*

Z. Zhang [26] apresenta bons resultados na obtenção dos parâmetros intrínsecos, comparativamente a outras técnicas. Este método proporcionou o aumento da facilidade de expansão da visão computacional a um grande leque de aplicações, devido à sua simplicidade e baixo custo.

F. Zhou e G. Zhang [28] desenvolveram um método de calibração para um sistema de visão óptico que inclui uma câmara e um laser que emite um feixe em linha. Neste processo de calibração são requeridas, pelo menos, duas perspectivas do alvo.

Q. Zhang e R. Pless [29] desenvolveram um novo método de calibração para plataformas que incluem uma câmara e um Laser Rangefinder (LRF) 2D. Este método consiste na observação de um padrão de calibração em forma de xadrez de modo a relacionar a imagem obtida pela câmara e o varrimento efectuado pelo laser.

Para que seja possível efectuar a relação entre os dados recolhidos pelo LRF e as imagens capturadas pela câmara, é necessário que a posição de cada sensor seja conhecida. Este método assume que os parâmetros intrínsecos são conhecidos e foca-se no cálculo dos parâmetros extrínsecos, que representam a posição relativa da câmara em relação ao plano do objecto. Um dos requisitos deste método é o facto do padrão de xadrez, durante o processo de calibração, ter de ser observado em simultâneo pelos 2 sensores. Resumindo, o procedimento de calibração deste método segue os seguintes passos:

- Colocação do padrão de xadrez numa posição visível pelos dois sensores, em diferentes perspectivas;
- Para cada posição do padrão, efectuar a leitura dos pontos do laser e relacioná-los com as imagens detectadas com a câmara;
- Estimativa da posição da câmara em relação ao alvo (rotação e translação);
- Estimativa da orientação e posição relativa da câmara relativamente ao laser;
- Optimização dos parâmetros obtidos.

Q. Zhang e R. Pless [29] apresentaram resultados satisfatórios, com melhorias na ordem dos 30% no que diz respeito à estimativa dos parâmetros de calibração do sistema.

Yu. Dong, X. Ye e X. He [30] propuseram um novo método de calibração de câmaras. Este método combina a ferramenta de calibração integrada no MATLAB com um algoritmo genético para calcular os parâmetros intrínsecos da câmara. Primeiro, usaram a ferramenta de calibração do MATLAB para obter os parâmetros intrínsecos iniciais. Depois, aplicaram o algoritmo genético para otimizar os parâmetros obtidos. Apresentando assim um método simples e eficiente, que tem um valor prático significativo para realizar a calibração da câmara e assegurar a precisão e viabilidade da mesma.

## 2.4.2 EMISSORES LASER

Os emissores de luz estruturada, também denominados como lasers (*light amplification by stimulated emission of radiation*) permitem a obtenção de dados para reconstrução tridimensional, alinhamento e medida. O seu funcionamento baseia-se na emissão estimulada de radiação, sendo que o primeiro laser foi criado em 1960, na Universidade de Stanford, EUA por Theodore Maiman [31].

Na área dos veículos subaquáticos, o laser tem sido aplicado em sistemas de visão computacional de ROVs, criando pontos de referência visuais artificiais, a partir do próprio veículo [14]. O laser também pode ser usado em sistemas de posicionamento dinâmico para embarcações de apoio a plataformas marítimas, também conhecidos como *fanbeam*. Em primeiro lugar, o sistema é utilizado para posicionar a embarcação próxima à plataforma, podendo medir até uma distância de 1000 metros, com um erro médio de apenas 10 cm. Após atingir a posição desejada, o sistema mantém a posição da embarcação em relação à plataforma [32].

O interesse em utilizar a visão computacional combinada com o laser como um método de sensoriamento para veículos subaquáticos não tripulados tem crescido nos últimos anos devido ao baixo custo e baixa complexidade [33].

Frequentemente, as imagens captadas debaixo de água têm pouca resolução e baixo contraste. Isto deve-se à turbulência do meio [33] e à atenuação da luz, que é um processo caracterizado por fenómenos de absorção e de dispersão provocados não só pela água, mas também pelas partículas nela presentes [34].

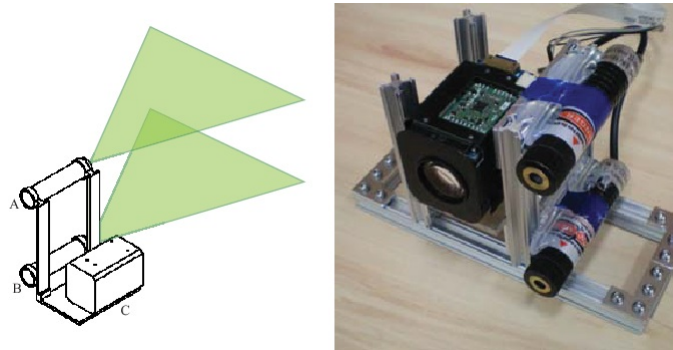
### Triangulação laser

Este método baseia-se na projecção de luz estruturada com a forma de uma linha, cruz ou uma matriz de pontos. Esta luz, ao incidir numa estrutura 3D, aparece distorcida em qualquer perspectiva que não seja a do projector, sendo que desse modo é recorrente utilizar câmaras para observar e processar a distorção do feixe. Analisando a distorção dos feixes de luz, é possível extrair-se a geometria do objecto visado, sendo este tipo de sistemas adequados para curtas distâncias (tipicamente menores do que 5 metros).

Vários autores investigaram a navegação baseada na visão com laser, H. Chen e C. Lee [35] apresentaram um sistema usando triangulação entre um ponto laser e a lente da câmara, os resultados mostraram que o sistema pode realizar com grande precisão o cálculo de distâncias e a localização de alvos, tanto no ar como debaixo de água. A triangulação foi expandida para dois lasers por H. Kondo

e T. Ura [21], onde os autores exploraram a informação obtida para identificar objectos. Neste caso, os lasers são montados paralelamente um ao outro.

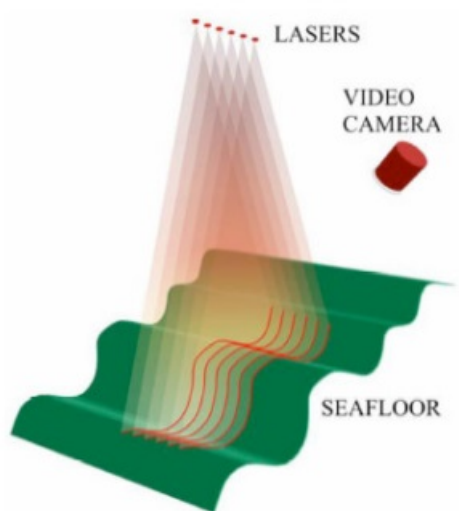
Outra solução para medir distâncias utilizando duas linhas laser paralelas (Figura 2.6) foi apresentada por C. Cain and A. Leonessa [36] para uma estimativa a 2D. A solução proposta consiste em cálculos usando triangulação 2D dos lasers, o que traz a vantagem de reduzir a complexidade computacional. Um pré-requisito para esta solução funcionar é a montagem com elevada precisão dos lasers paralelos e do ângulo entre os mesmos e a câmara. A principal vantagem deste método com sensor activo é a facilidade do processo, o baixo custo dos componentes e a simplicidade do sistema.



*Figura 2.6: Esquema do sensor do lado esquerdo e fotografia do lado direito[37].*

M. Caccia [14] criou um sensor óptico de triangulação, que consiste numa câmara montada no centro de um painel quadrangular e quatro lasers vermelhos fixos, um em cada canto. O sistema mede a distância entre o veículo e o fundo do mar e é capaz de determinar as variações angulares do veículo, medindo o tamanho dos obstáculos naturais ou artificiais que encontra.

Um método que combina linhas laser paralelas foi apresentado por S. Tetlow [38], sendo possível estudar as rugosidades do fundo do oceano. Os lasers foram instalados no veículo de forma a que ao navegar próximo do fundo do oceano as suas projecções formassem seis linhas laser de aproximadamente 0,5 m, como ilustrado na Figura 2.7.



*Figura 2.7: Esquema de câmara e lasers [39].*

Todos os trabalhos descritos anteriormente utilizam um ou mais lasers combinados e as lentes formam raios laser, cuja projecção forma pontos ou linhas no plano onde são projectadas. O sistema de processamento de imagens utiliza essa projecção como referência para fornecer informações necessárias que possibilitam ao sistema calcular distâncias, ângulos de posicionamento, velocidade de deslocamento e até medir tamanhos de objectos.

Além da forma e quantidade de lasers a serem utilizados, a sua potência e o comprimento de onda (cor) podem influenciar os resultados durante o processamento de imagem. O seu custo também varia, sendo que os lasers azuis são os mais caros, seguidos pelos verdes. Por outro lado, os lasers vermelhos são os mais comuns e também os mais baratos no mercado.

Os lasers mais utilizados nesta área são os vermelhos, que operam em comprimentos de onda entre os 633 e 680 nm, e os verdes, que funcionam em comprimentos de onda de 532 nm do espectro de luz visível. Normalmente, a faixa de comprimentos de onda do laser vermelho apresenta maior atenuação da intensidade luminosa, quando aplicados em ambientes subaquáticos, limitando assim a distância de utilização. Por sua vez, embora o laser de espectro verde apresente uma maior reflexão, sofre menor atenuação de intensidade luminosa, sendo por isso mais recomendado do que os vermelhos [40].

## 2.5 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentadas sumariamente as tecnologias que existem na área dos sistemas de navegação em ROVs, sendo dado um maior foco na navegação e na visão laser e ainda na calibração da câmara. Para isso, foi necessário realizar um estudo sobre os trabalhos que foram desenvolvidos na área. Nesta fase, as aplicações subaquáticas mereceram especial atenção, de forma a entender quais as tecnologias que são aplicadas neste meio para a obtenção de imagem. Para terminar, foi necessário compreender o modo como é efectuada a calibração de um sistema que possua uma câmara, assim como a importância do mesmo.





# CAPÍTULO 3

## PERCEPÇÃO E NAVEGAÇÃO COM ROV

---

O objectivo deste capítulo é descrever a arquitectura do sistema, assim como a configuração de controlos de navegação e o processo de calibração da câmara e de visão com laser. Por último são apresentadas as etapas de navegação automatizada, com os vários exemplos de percursos pré-definidos, assim como de detecção e desvio de obstáculos.

### 3.1 DIAGRAMA DO SISTEMA

O código de desenvolvimento das funcionalidades do ROV, assim como da navegação do mesmo foi realizado em C/C++, já que é a linguagem de desenvolvimento implementada pela marca do ROV, a VideoRay, que disponibiliza código para fins de investigação. O fluxo de comunicação entre o ROV e o operador, usado neste trabalho, está representado na Figura 3.1, assim como a comunicação entre o sistema e o ROV na troca de pacotes entre os mesmos. O sistema envia comandos para o ROV que controla os motores e adquire dados sensoriais. Estes são enviados de volta ao sistema para que possam ser processados.

Além disso, o ROV envia os dados de vídeo captados para que estes sejam processados em tempo real pelo MATLAB. Este processa os *frames* recebidos, começando pela calibração dos mesmos, seguindo-se a detecção de obstáculos e cálculo da distância aos mesmos. Esta informação é enviada para o programa de navegação que efectua assim manobras de desvio durante o seus percursos pré-definidos.

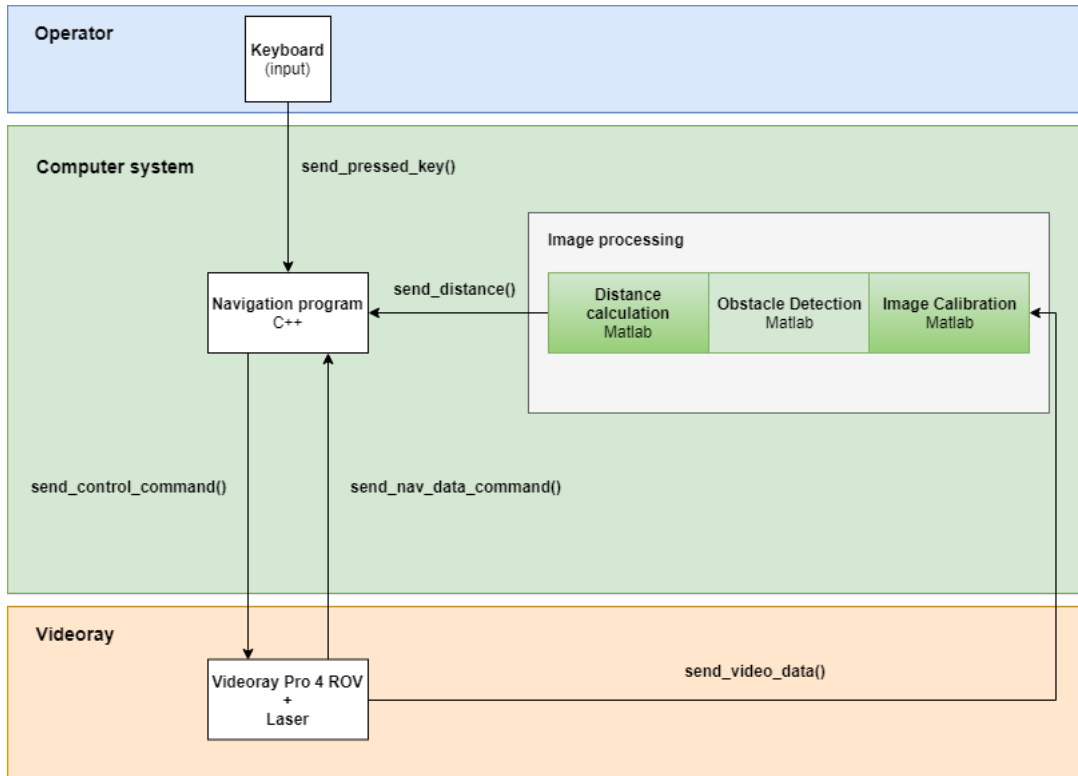


Figura 3.1: Diagrama do sistema.

## 3.2 CONFIGURAÇÃO DE CONTROLOS AUTÓNOMOS

### Controlo do ROV

Originalmente, o controlo do ROV era realizado com recurso a um comando, este é usado para controlar os motores do ROV, para possibilitar a navegação assistida do mesmo. Também é possível realizar outras funções como gravar vídeos, captar fotografias, controlar o ângulo da câmara e as luzes. Os botões do comando estão ilustrados na Figura 3.2.



Figura 3.2: Botões de controlo do ROV<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>[http://download.videoray.com/documentation/v1\\_7\\_0/html/pro4/equip\\_controller](http://download.videoray.com/documentation/v1_7_0/html/pro4/equip_controller).

*Tabela 3.1: Controlos programados do ROV.*

Tecla	Função
1	Percurso em linha recta – orientação fixa
2	Percurso em quadrado
W	Mover em frente
A	Mover para trás
S	Curvar para a esquerda
D	Curvar para a direita
L	Ligar/Desligar luzes
F	Alterar focagem lente
O	Definir profundidade (40)
Z	Imobilizar o veículo

Para a implementação de novas funções, tais como a activação da orientação automática e da execução de uma trajectória, optou-se por utilizar o teclado do sistema para a execução das mesmas. Assim na Tabela 3.1 são apresentados os botões de navegação implementados neste novo sistema. Desta forma, os utilizadores podem controlar manualmente o ROV, tal como anteriormente com o comando, e podem ainda activar as novas funções.

Estas novas funcionalidades permitem ao ROV seguir um percurso previamente definido, o que pode ser vantajoso quando se quer inspeccionar redes de pesca ou durante uma investigação ao longo da linha da costa, por exemplo. Adicionalmente, é possível activar a função de seguimento de trajectória, que permite que o ROV siga percursos previamente definidos, que serão explicados mais à frente. Para simplificar os processos, as luzes reflectoras frontais, que podem variar numa gama entre 0 e 100, possuem apenas a opção de desligar (valor: 0) ou ligar (valor: 80). Da mesma forma, o motor vertical, quando activado, coloca o motor a um valor constante de 40.

### **Percursos de navegação automatizada**

A função de navegação automatizada, referida anteriormente, permite que o ROV siga um percurso previamente definido, baseando a sua orientação no campo magnético terrestre. Assim, foram implementados dois percursos:

#### **Percurso 1: Navegação em linha recta**

Este é um percurso simples, que serve como ponto de partida para melhor compreensão dos processos necessários para a correcta implementação do sistema autónomo. Neste caso, os propulsores traseiros são ajustados para seguir a orientação presente no momento em que o operador inicia a acção.

---

```
float k = 0.3;
heading = vrc.heading();
delta = heading_set - heading;
vrc.set.vertical_thruster(20);
vrc.set.starboard_thruster(70-k*delta);
vrc.set.port_thruster(70+k*delta);
```

---

*Bloco de código 1: Código C++ com os comandos de ativação dos motores do veículo.*

html, acedido em 06/06/2018

Foi calculado um ganho proporcional ( $k$ ) que representa a constante de proporcionalidade entre a potência dos motores e a variação da orientação do veículo. Dependendo da diferença entre a orientação pretendida e a orientação actual é feito um ajuste gradual da velocidade do veículo, sendo que quanto menor for essa diferença, menor é a potência aplicada aos motores de modo a corrigir a direcção de uma forma suave.

### Percurso 2: Navegação com mudanças de direcção

Este segundo percurso já apresenta variações de direcção, sendo que a navegação em linha recta é realizada do mesmo modo que o percurso anterior. Pretende-se então realizar a navegação em forma de quadrado, obrigando o ROV a mudar de direcção quatro vezes, para voltar ao ponto inicial.

Para efectuar as mudanças de direcção, foi colocado um temporizador, para que a cada 10 segundos o ROV realize uma curva à esquerda até que a sua nova orientação seja  $90^\circ$  em relação à anterior, para isto é accionado apenas o motor direito, sendo verificada constantemente a orientação do veículo. Assim, pretende-se que o ROV complete um percurso com quatro mudanças de direcção, assinaladas na Figura 3.3, com o objectivo de efectuar uma rotação de  $360^\circ$  e regressar ao local de partida.

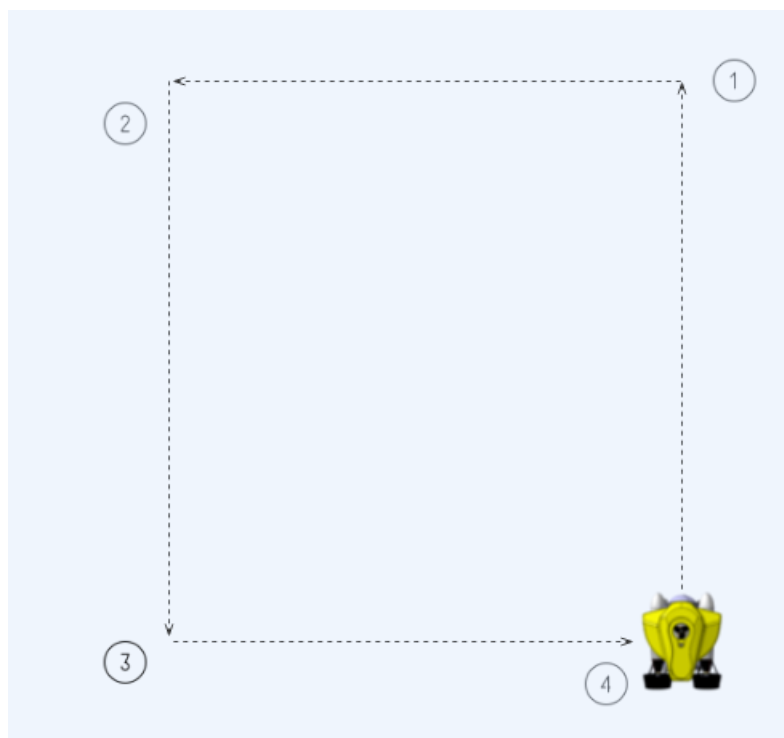


Figura 3.3: Ilustração do percurso de navegação em quadrado.

### Sistema de propulsão

O ROV tem três motores no total. Dois deles permitem que o ROV se mova em *surge* e *yaw*, enquanto que o terceiro motor move o veículo em *heave*. Todos os motores têm a rotação da hélice em ambos os sentidos, tendo velocidade variável e estão localizados de modo a que o veículo tenha um ângulo de viragem curto. Isto permite que o veículo seja extremamente fácil de manobrar, e funciona como uma plataforma estável para a câmara e os outros sensores. Todos os motores têm uma velocidade de reacção grande e respondem com enorme precisão aos comandos enviados.

### Motores traseiros (principais)

Os motores traseiros estão montados na parte de trás do veículo, como se pode ver na Figura 3.4, produzindo uma força *surge* e um momento *yaw*. Os propulsores recebem um valor inteiro entre -100 (velocidade máxima para trás) e 100 (velocidade máxima em frente), onde a combinação dos valores destes dois motores é usada para a propulsão do veículo.

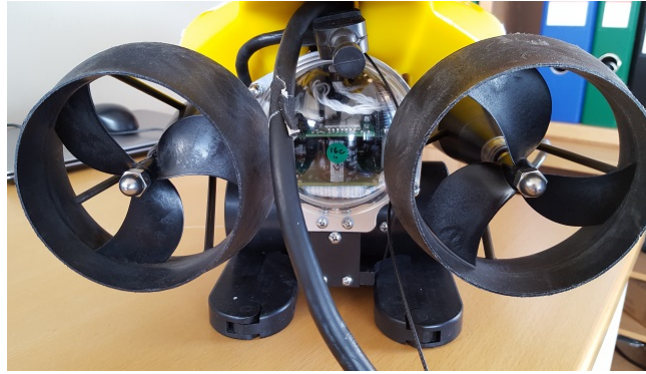


Figura 3.4: Motores traseiros.

### Motor vertical

O motor vertical encontra-se na parte superior do ROV, e os seus valores podem variar entre -100 e 100. Este motor permite ao ROV ascender e subir rapidamente, mas produz também um pequeno *momentum yawing*.

## 3.3 PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DA CÂMARA DO ROV

Para a calibração da câmara do ROV recorreu-se à ferramenta *Camera Calibrator* fornecida pelo MATLAB. Este processo permite estimar os parâmetros intrínsecos, extrínsecos e a distorção da lente, assim como mostrar o resultado da calibração das imagens processadas. Foram realizados testes de calibração iniciais no laboratório, sendo que foi também possível proceder aos testes dentro de água, na piscina, como é possível verificar na Figura 3.6.



Figura 3.5: Passos de calibração (adaptado de [41]).

Seguindo o processo anterior, com os passos de calibração da câmara:

1. Preparar as imagens, a câmara e o padrão em xadrez para calibração.
2. Adicionar as imagens à aplicação.
3. Calibrar a câmara.
4. Avaliar a precisão da calibração.
5. Ajustar parâmetros para melhorar a precisão (se necessário).
6. Exportar os nove parâmetros obtidos.

Para obter melhores resultados, foram utilizadas vinte imagens sendo que estas foram captadas com o padrão de calibração a uma distância de 1 metro, dado que é a distância de interesse para posterior utilização. Desta forma, mesmo que uma imagem apresente uma elevada margem de erro na calibração, devido à má visibilidade ou outro factor externo, não irá afectar o resultado da calibração.

Foram usadas imagens em Portable Network Graphics (PNG), dado que este formato apresenta uma compressão de imagem sem perda de qualidade. O padrão foi colocado em diversos ângulos de inclinação e orientações e em vários pontos da janela de captura de imagem, de modo a cobrir os vários pontos da câmara. O processo foi realizado sem alteração da distância entre o padrão e a câmara, e as definições desta, tais como o zoom e formato de imagem, foram mantidas durante a sequência de imagens, caso contrário poderiam alterar os resultados finais.

### Padrão do tipo tabuleiro de xadrez

Tal como a maior parte das calibrações, esta também foi realizada com recurso ao tabuleiro de xadrez. Este objecto de calibração é bastante usado dado que contém vários pontos, facilmente identificáveis a uma distância uniforme, o que simplifica o processo de calibração. Neste caso, foi impresso um típico tabuleiro de xadrez num formato A3, posteriormente plastificado de modo a ser usado dentro de água. Foi necessário medir o tamanho de um quadrado do tabuleiro, dado que esta medida serve de referência para a calibração e varia consoante as definições de impressão.

### Deteção de pontos

Após o processamento da calibração, é mostrada uma janela com vários painéis que serão explicados de seguida.

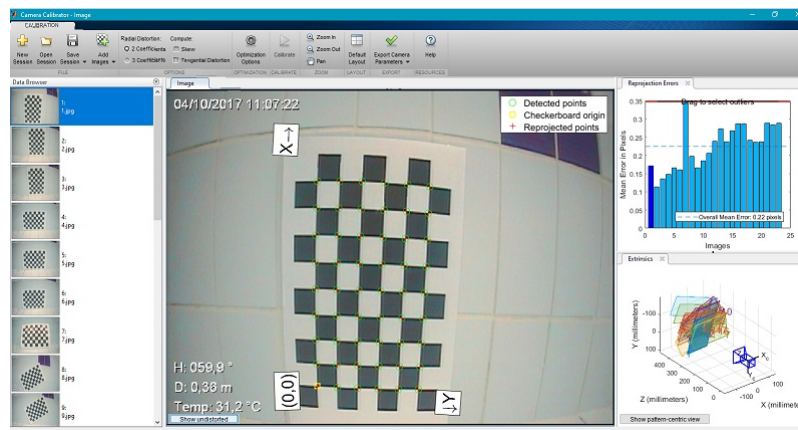


Figura 3.6: Toolbox de calibração do Matlab.

No painel do lado esquerdo, são apresentadas as várias imagens que contêm o padrão detectado e são mostradas apenas as imagens válidas, sendo descartadas aquelas onde não foi possível fazer correctamente a análise da imagem. No painel central, é mostrada a imagem seleccionada atualmente, mostrando a verde os vários pontos detectados. A amarelo é mostrado a coordenada de origem (0,0). São ainda apresentados os eixos X e Y que indicam a orientação do padrão.

#### Algoritmo de calibração[41]

O algoritmo de calibração utilizado assume um modelo de câmara *pinhole*:

$$w[xy1] = [XYZ1] \begin{bmatrix} R \\ t \end{bmatrix} K \quad (3.1)$$

- (X, Y, Z): coordenadas reais do ponto
- (x, y): coordenadas da imagem correspondentes aos pontos em pixels
- w: factor de escala homogéneo
- R: matriz que representa a rotação em 3-D da câmara.
- t: translação da câmara relativa ao sistema de coordenadas reais.
- K: matriz intrínseca da câmara, definida por:

$$\begin{bmatrix} fx & 0 & 0 \\ s & fy & 0 \\ cx & cy & 0 \end{bmatrix}$$

Figura 3.7: Matriz intrínseca.

As coordenadas [cx, cy] representam o centro óptico (ponto principal), em pixels. Quando o eixo x e y são perpendiculares, o parâmetro de distorção, s, é igual a 0.

- $fx = F \cdot sx$
- $fy = F \cdot sy$
- F, representa a distância focal em coordenadas reais, em milímetros.

$sx, sy$  representam o número de pixels por unidade real na direcção x e y, respectivamente.

- $fx$  e  $fy$  são representados em pixels.

O algoritmo de calibração estima os valores dos parâmetros intrínsecos, extrínsecos e os coeficientes de distorção. A calibração da câmara envolve dois passos:

1. Determinar em forma fechada, os parâmetros intrínsecos e extrínsecos, assumindo que a distorção das lentes é zero [42].

2. Estimar todos os parâmetros de forma simultânea, incluindo os coeficientes de distorção, usando a minimização não-linear de quadrados mínimos (algoritmo de Levenberg-Marquardt). Usar a solução

fechada do passo anterior como estimativa inicial dos parâmetros da câmara. Definir a estimativa dos coeficientes de distorção a zero [42] [43].

### Avaliação dos resultados de calibração

É possível avaliar a precisão da calibração através da verificação do gráfico de projecção de erros, dos parâmetros extrínsecos da câmara e também através da imagem distorcida (calibrada).

A projecção de erros representa o desfasamento entre a distância dos pixels detectados e dos pontos projectados. O software calcula o erro através da projecção dos pontos do tabuleiro em coordenadas reais, definido pelo padrão, em coordenadas de imagem. Após isso, o software compara os pontos projectados com os respectivos pontos detectados. Diferenças inferiores a um pixel de erro são aceitáveis.

A aplicação de calibração mostra, em pixels, um gráfico de barras com os erros de projecção. O gráfico da Figura 3.8 ajuda a identificar imagens que afectam negativamente o processo de calibração.

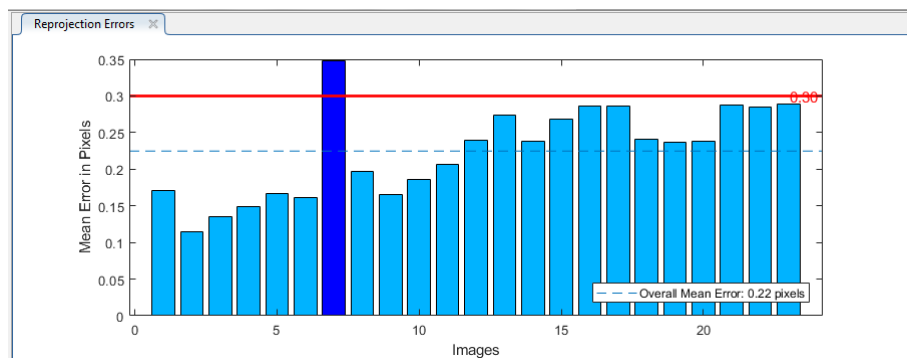


Figura 3.8: Gráfico de projecção de erro.

Analisando o gráfico da Figura 3.8, é possível identificar facilmente as imagens onde o erro é superior ao limite definido, que neste caso é de 0,3 pixels. Assim, podemos detectar apenas uma imagem fora deste limite e a mesma deve ser eliminada para otimizar o processo de calibração.

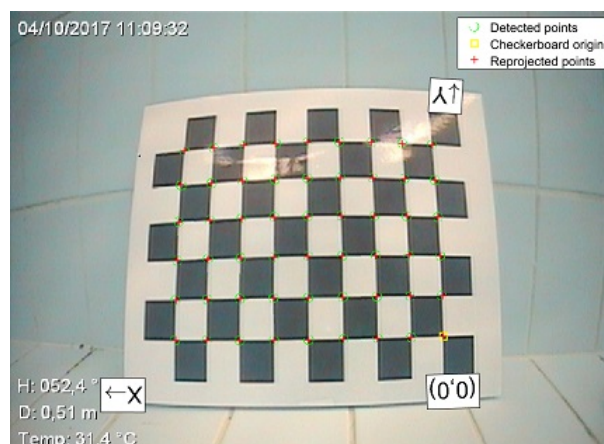


Figura 3.9: Imagem inadequada para calibração.

Na Figura 3.9 podemos visualizar a imagem referida anteriormente, que ultrapassa o limite máximo definido. O leitor pode facilmente perceber que o erro elevado se deve à reflexão da luz na superfície



do padrão de xadrez, dificultando a detecção dos vértices. Através do processo anterior foi possível calcular os parâmetros intrínsecos e extrínsecos, fundamentais para automatizar a calibração das imagens obtidas em tempo real pelo veículo.

*Tabela 3.2: Parâmetros da câmara.*

Parâmetro	X (pixels)	Y (pixels)
Distância focal	406,40	493,84
Ponto principal	324,98	306,03
Distorção radial	-0,314	0,124
Resolução da imagem	640	480

Originando a seguinte matriz:

$\text{IntrinsicMatrix} = [406,3972 \ 0 \ 0; 0 \ 493,8411 \ 0; 324,9804 \ 306,0343 \ 1];$

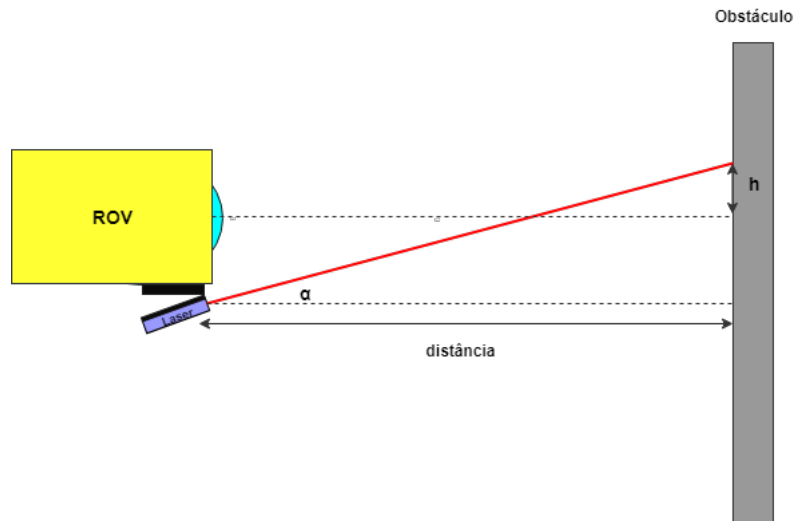
## 3.4 SISTEMA DE VISÃO LASER

O sistema de visão laser faz uso de dois componentes essenciais do nosso sistema, a câmara embutida no ROV e o laser que foi acoplado ao mesmo, posteriormente. Este sistema vai permitir que o ROV detete obstáculos através da projecção do laser nos mesmos e que execute manobras evasivas de modo a evitar colisões que possam pôr em causa a estrutura do veículo. Assim, com recurso ao MATLAB, criou-se um sistema que, em tempo real, consiga dar resposta às imagens que o ROV lhe fornece, fazendo calibração, análise e tomada de decisão num curto intervalo de tempo.

### Calibração do Laser

O laser, como referido anteriormente, tem um papel preponderante para atingir os objectivos pretendidos, já que vai permitir, não só detectar os obstáculos, como também a distância a que se encontram.

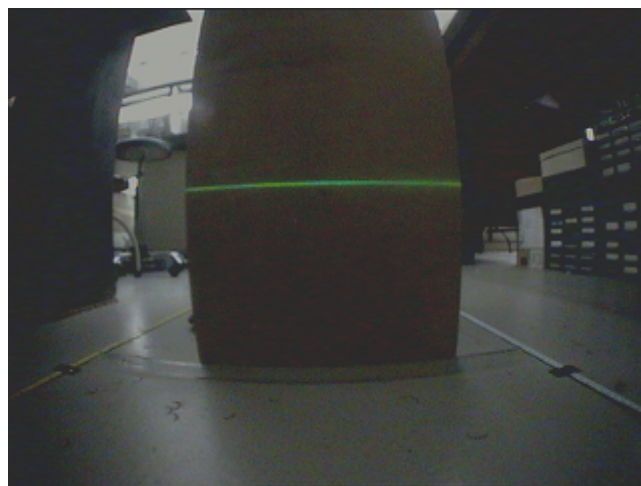
Para integrar o laser no ROV, foi desenvolvido um sistema para acoplar o mesmo, sendo este colocado na parte de baixo do ROV numa plataforma com inclinação que pode ser ajustada, como mostrado na Figura 3.10.



*Figura 3.10: Diagrama de projeção do laser num obstáculo.*

Como podemos observar pela Figura 3.10, o laser está posicionado com uma inclinação e caso exista um obstáculo próximo, este irá projectar uma linha recta no mesmo. Deste modo, através de equações trigonométricas, é possível calcular a distância a um obstáculo, consoante a posição em coordenadas cartesianas onde o laser incidir.

O laser foi colocado com uma inclinação de 28 graus, para maximizar a variação de incidência do laser, para distâncias pequenas, sem que saia do campo de visão do ROV. Para proceder à calibração, foram realizados testes a várias distâncias conhecidas, entre 10 e 100 cm, com intervalos de 5 cm. Através deste teste, foi possível correlacionar a distância do objecto detectado com a posição em Y onde o laser incide no plano de visão do ROV, resultando na Tabela 4.1.



*Figura 3.11: Projecção do laser num obstáculo.*

A imagem da Figura 3.11 é um exemplo da projecção do laser num obstáculo. Este projecta uma linha recta paralela ao eixo horizontal no plano de projecção, o que permite detectar numa área mais abrangente a presença de obstáculos.

## Análise de imagem em MATLAB

Nesta fase, estão reunidas as ferramentas necessárias para o processo de análise de imagem em tempo real. Este está esquematizado na Figura 3.12 e será analisado etapa a etapa.



Figura 3.12: Etapas de processamento de imagem em Matlab.

### Ler *frame* de vídeo

O método de processamento da imagem em tempo real, começa com a aquisição de imagens a partir do ROV, este processo é realizado através da criação de um objecto de vídeo que para efeitos de processamento, faz uma captura automática do *frame* a cada 0,1 segundos. Esta imagem é capturada em formato RGB (Red, Green, Blue) e tem a resolução de 640x480.

---

```
% create video object (command webcamlist to find my camera)
handles.cam = videoinput('winvideo', 1, 'YUY2_640x480'); % \ac{rov} camera
handles.cam.ReturnedColorspace = 'rgb';

% set timer function
handles.camTimer = timer('ExecutionMode','fixedRate',...
    'Period',1.0,...
    'TimerFcn',{camTimerFcn,handles});pic = getsnapshot(handles.cam);
```

---

Bloco de código 2: Código em Matlab dos métodos de visualização e captura de imagem.

Cada *frame* obtido é enviado para o programa principal para ser processado.

### Obter imagem calibrada

Após a captura de cada *frame*, é necessário proceder à calibração do mesmo dada a distorção presente na câmara do ROV. Este processo já foi explicado no subcapítulo 3.3, pelo que agora apenas é necessário introduzir os parâmetros obtidos.

---

```
%% Undistort Image with Camera Parameters
% Parameters obtained in previous test with the checkerboard
IntrinsicMatrix = [406.3972 0 0; 493.8411 0; 324.9804 306.0343 1]; %
    parameters inside water images

radialDistortion = [-0.3140 0.1243];
cameraParams=cameraParameters('IntrinsicMatrix',IntrinsicMatrix ,
'RadialDistortion',radialDistortion);

img_undis = undistortImage(redLine , cameraParams); % Undistort Image
img_tmp = rgb2hsv(img_undis); % convert RGB to HSV
```

---

*Bloco de código 3: Código em Matlab com a atribuição dos parâmetros da câmara.*

Além da calibração é também feita uma conversão da imagem de Red, Green, Blue (RGB) (formato de captura original) para Hue, Saturation, Lightness (HSV), dado que este último permite uma maior precisão no processamento de imagem.

### Manipular Imagem

Nesta etapa são realizadas as operações necessárias para transformar a imagem de modo a facilitar a detecção da linha laser projectada. O primeiro passo é extrair as matrizes 2D das imagens que correspondem, neste caso, aos três parâmetros do formato da imagem – HSV.

---

```
% Extract each color
h = img_tmp(:, :, 1);
s = img_tmp(:, :, 2);
v = img_tmp(:, :, 3);
```

---

*Bloco de código 4: Código em Matlab para extração das matrizes da imagem processada em formato HSV.*

H – Matiz (tonalidade): verifica o tipo de cor;

S - Saturação: quanto menor o valor, com mais tom de cinza aparecerá a imagem;

V – Valor (brilho): define o brilho da cor.

O objetivo passa por encontrar os melhores parâmetros que façam realçar a projecção do laser, desprezando outras cores existentes. Através da análise de *frames*, foi possível extrair as propriedades da imagem nos pixels verdes e assim criar um filtro com o espectro desejado, para se obter uma imagem ‘limpa’ e otimizada.

$H = [184, 219] \mid S = [51, 85] \mid V = 255$

Com o filtro anterior é possível restringir a imagem a um espectro de cores mínimo, que vai ajudar a eliminar falsos positivos criados por superfícies semelhantes à cor do laser. Após a aplicação deste filtro, é ainda realizado um *threshold* de modo a limitar a gama de valores. Este pode ser alterado em tempo real, durante a execução do programa. Por fim, a imagem é convertida num *array* bidimensional para facilitar o processo de detecção de obstáculos na etapa seguinte.

---

```
%find nonzero values in array
[rows, columns] = find(img_bw);
```

---

*Bloco de código 5: Código em Matlab para filtrar os valores nulos presentes na imagem processada.*

### Detetar obstáculos

Nesta etapa já é possível proceder à detecção de obstáculos. Para isso, tirando partido da imagem manipulada obtida anteriormente, é realizada uma operação simples para calcular o pixel ‘mais popular’ no eixo do Y. Tendo em consideração que a imagem está num referencial cartesiano, sabemos que o laser irá projectar uma linha, paralela ao eixo do X, no obstáculo onde incide. Assim, calculando o pixel Y com mais ocorrências, podemos determinar o ponto de incidência no obstáculo.

---

```
% Filter out vertical laser pixels
popular = mode(rows); % row value most common

% find obstacle
thresh = str2double(get(handles.threshEdit, 'String'));
h = get(handles.imageTypeSelection, 'SelectedObject');
imageType = get(h, 'UserData');
findObstacleFcn(pic, thresh, imageType, handles.axes1);
```

---

*Bloco de código 6: Código em Matlab com funções de detecção de obstáculos.*

### Calcular distância e posição

Com os dados obtidos anteriormente, é agora possível calcular a distância do ROV ao obstáculo e também se este se localiza mais à esquerda ou à direita do percurso de passagem do mesmo. Utilizando a equação 4.3, é possível calcular a distância e através da média dos valores de X podemos determinar a posição.

---

```
% Location of obstacle
Xmedio = mean(columns);

m = ((x-355.7)/-4395); % equation of f(dist)
if(m <= 0)
    dist = 0;
else
    dist = nthroot(m, -1.153); % error when hthroot < zero
```

---

---

*Bloco de código 7: Código em Matlab para calcular distância e localização do obstáculo no plano 2D.*

Para efeitos de visualização gráfica, as seguintes condições permitem perceber em tempo real a distância e posição do obstáculo detectado:

---

```
% Message according to the distance
if dist2 <10 && dist2 >0
warning = ('PERIGO: Colisao eminente');
elseif dist2 >= 10 && Xmedio > 340
warning = ('AVISO: Obstaculo do lado direito');
elseif dist2 >= 10 && Xmedio < 300
warning = ('AVISO: Obstaculo do lado esquerdo');
elseif dist2 >= 10 && Xmedio > 300 && Xmedio < 340
warning = ('AVISO: Obstaculo em frente');
else
warning = ('Nao existem obstaculos perto');
end
```

---

*Bloco de código 8: Código em Matlab para estabelecer a resposta do programa consoante a distância e posição calculada.*

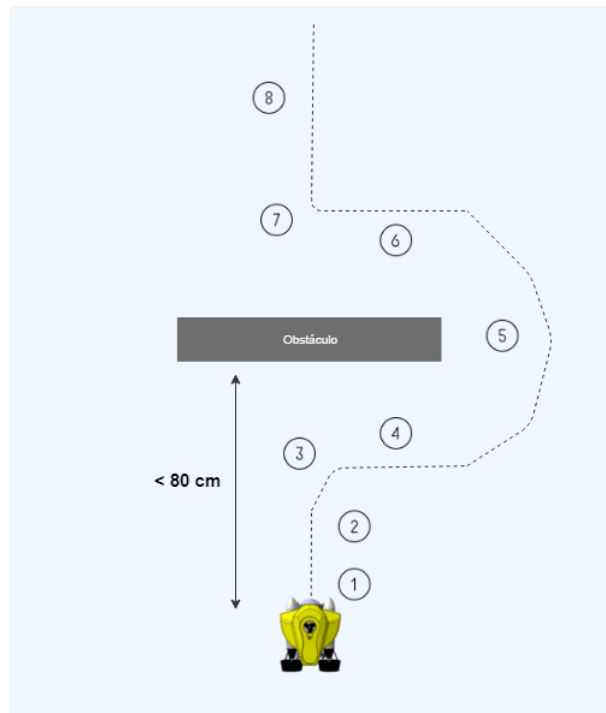
### **Comunicação entre MATLAB e ROV**

Os valores calculados anteriormente, da distância e localização, são enviados e actualizados em tempo real para um ficheiro de texto, para que possam ser acedidos pelo programa de controlo do ROV, que irá usar os valores para proceder a manobras evasivas, caso seja detectado algum obstáculo em frente. Este método de comunicação não é o mais eficaz, como será explicado mais à frente, mas foi a solução encontrada para a comunicação entre dois programas em execução em sistemas operativos distintos. Isto porque o programa de controlo é executado numa máquina virtual Linux (Ubuntu 14.10) e o MATLAB em Windows 10, devido a problemas de compatibilidade na versão em Linux.

## 3.5 DESVIO DE OBSTÁCULOS

Neste último subcapítulo, é abordado o objectivo final desta dissertação, a implementação do sistema de desvio de obstáculos. Este é fundamental nos casos em que o ROV está a executar um percurso automatizado, evitando colisões com obstáculos que apareçam no caminho e permitindo que o veículo atinja o seu destino. Assim, nos dois casos automatizados definidos, é implementada uma verificação usando os valores calculados pelo MATLAB no subcapítulo anterior. Estes estão guardados num ficheiro que é acedido constantemente pelo programa, como referido anteriormente.

São aplicadas verificações de distância, assim, caso um obstáculo esteja a menos de 80 cm, é executada uma manobra evasiva para o evitar, como ilustrado na Figura 3.13.



*Figura 3.13: Ilustração do percurso de desvio de um obstáculo.*

Na Figura 3.13 estão assinaladas as várias fases do percurso realizado pelo veículo assim que detecta um obstáculo a menos de 80 cm. Estas fases são definidas por:

1. Paragem acentuada com propulsores em sentido contrário;
2. Paragem ligeira com imobilização dos propulsores;
3. Rotação à direita;
4. Avanço em perpendicular à posição inicial;
5. Contorno em U sobre o obstáculo;
6. Paragem acentuada;
7. Ajuste de orientação;
8. Continuação da orientação definida.

## 3.6 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada a implementação do sistema e dos vários módulos que o constituem com especial foco na interacção entre o software e o ROV. Além disso, foi possível perceber o processo de calibração de câmara usado, que mostra assim a ultrapassagem de uma das principais dificuldades no processamento de imagem.

A explicação de cada etapa na análise da imagem no MATLAB é importante para se compreender os passos necessários para uma detecção correcta e eficaz da linha laser projectada. Por último, o algoritmo de desvio de obstáculos é importante para se perceber de que modo o veículo reage consoante a informação que recebe do MATLAB. Assim, no próximo capítulo é possível apresentar resultados experimentais realizados em ambiente controlado, onde são colocados em prática os métodos apresentados anteriormente.



# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS

---

Este capítulo apresenta os testes experimentais realizados com o VideoRay Pro 4, em ambiente controlado com boa visibilidade. Os resultados do sistema de navegação autónoma estão divididos em vários casos. Para ilustrar de forma simples o processo realizado. Da mesma forma, são mostradas as limitações, objectivos alcançados e os resultados do processamento de imagem para a calibração da câmara.

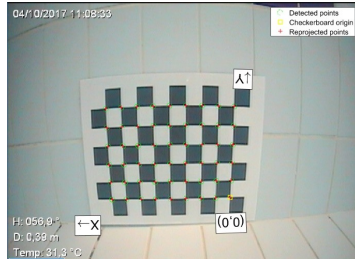
Todos os testes foram efectuados em cooperação com o Clube dos Galitos, que cederam as suas instalações para a realização dos mesmos. Em primeiro lugar, serão apresentados os resultados da calibração da câmara, assim como uma análise do processo de calibração do sistema de navegação. Posteriormente, serão apresentados os resultados do sistema de navegação, fazendo uma análise dos vários casos testados, assim como das aplicações que estas tecnologias podem ter em diferentes cenários.



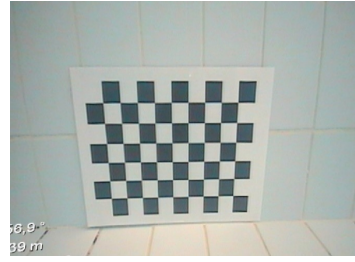
*Figura 4.1: Local de testes<sup>1</sup>.*

---

<sup>1</sup><https://pt.foursquare.com/v/piscina-do-galitos/4cca6fb315bb9c74e1ab5885?openPhotoId=51cdc23e498e1874e9e96543>, acedido em 05/06/2018



*Figura 4.2: Imagem original.*



*Figura 4.3: Imagem calibrada.*

## 4.1 DETECÇÃO E DESVIO DE OBSTÁCULOS

Este processo resulta para casos gerais, como paredes ou objectos regulares. Para casos em que existam vários obstáculos e com superfícies irregulares poderá haver problemas na detecção correcta dos obstáculos ou não ser possível a identificação de vários no mesmo plano a distâncias próximas. Para o processo de detecção de obstáculos, a calibração da câmara e o processamento da imagem foram essenciais.

### Resultados da calibração da câmara

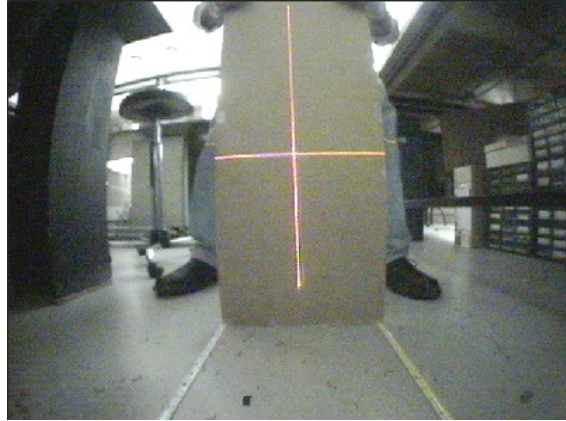
Após a realização dos passos explicados no subcapítulo 3.3, onde é feita uma análise de todas as etapas necessárias no processo de calibração, são agora apresentados os resultados da mesma.

Na Figura 4.2 podemos ver a imagem original produzida pela câmara do ROV, sendo que após a realização do processo de calibração, é apresentada a imagem calibrada, que pode ser vista na Figura 4.3.

A calibração revela alguns problemas nas zonas mais próximas dos limites da imagem, algo que é expectável dada o elevado factor de distorção provocado pela lente da câmara. Ainda assim, esses problemas não são prejudiciais dado que o nosso foco é a zona central da imagem, onde de facto o veículo pode colidir com obstáculos.

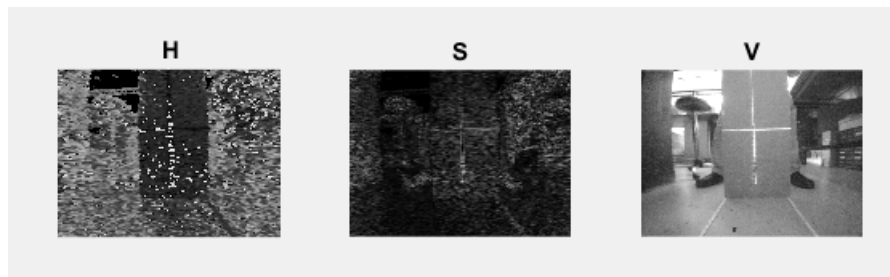
### Resultados do processamento de imagem

Partindo da imagem calibrada anteriormente, é agora possível proceder ao processamento da imagem obtida, aplicando os filtros necessários para a otimização na detecção do laser, como foi referido no subcapítulo 3.4.



*Figura 4.4: Laser a incidir num obstáculo.*

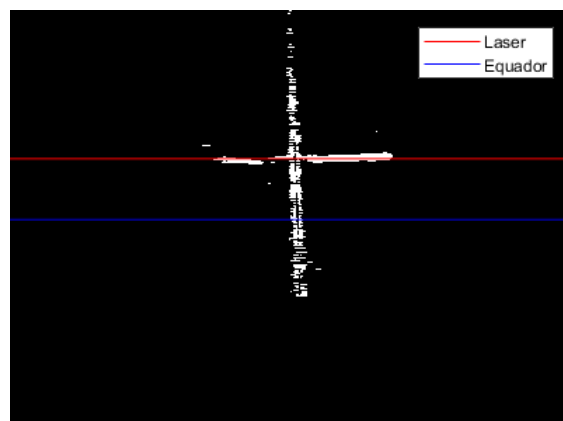
Numa primeira fase, usando a imagem 4.4 como exemplo, esta foi dividida em três parâmetros, resultando nas seguintes camadas:



*Figura 4.5: Camadas de cor da imagem.*

Estes filtros, como referido no subcapítulo 3.3, dizem respeito à tonalidade, saturação e brilho da imagem.

Após aplicar um filtro para realçar a cor do laser, obtemos a imagem da Figura 4.6.



*Figura 4.6: Imagem após filtro de cor.*

Através da imagem 4.6 é possível detectar a linha laser horizontal projectada no obstáculo. Para melhor visualização, e devido à sua espessura, esta é assinalada com uma linha horizontal vermelha,

como podemos ver na Figura 4.6. Aplicando a fórmula da Equação 4.3, podemos calcular que o obstáculo se encontra a uma distância de 50 cm. Este exemplo, mostra os resultados obtidos pelo programa, os quais calculados em tempo real, possibilitando uma resposta do veículo face aos resultados obtidos.

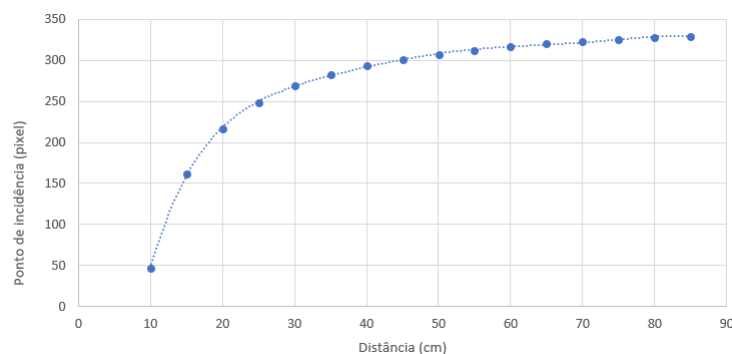
### Resultados da detecção das distâncias ao obstáculo

Através da captura de imagens com o laser a incidir num obstáculo, posicionado a várias distâncias conhecidas, foi possível construir a Tabela 4.1. Esta Tabela mostra a correspondência entre as várias distâncias entre o conjunto ROV - obstáculo e o pixel no eixo vertical onde é projetada a linha laser no obstáculo.

*Tabela 4.1: Distância vs Posição.*

Y (pixel)	Distância (cm)	Y (pixel)	Distância (cm)
47	10	315	60
164	15	319	65
214	20	322	70
248	25	325	75
266	30	328	80
284	35	331	85
297	40	332	90
303	45	330	95
309	50	334	100
313	55		

Com os dados adquiridos, presentes na Tabela 4.1 é possível obter a expressão que traduz a distância em função do pixel de projecção do laser. Para isso, recorreu-se a uma ferramenta do MATLAB que permite calcular a função que se ajusta melhor aos dados inseridos. Assim, foi possível obter o gráfico da Figura 4.7 com base nos valores calculados anteriormente.



*Figura 4.7: Gráfico de distância em função do pixel de incidência.*

Como podemos ver, a função que melhor se adequa é do tipo exponencial negativa, o que vai de encontro às expectativas, dado que à medida que a distância do obstáculo aumenta, a projecção da linha laser tende para um ponto de saturação.

$$Y = a * x^b + c \quad (4.1)$$

Onde  $a = -4395$ ,  $b = -1,153$  e  $c = 355,7$

Assim,

$$Y = -4395 * x^{-1,153} + 355,7 \quad (4.2)$$

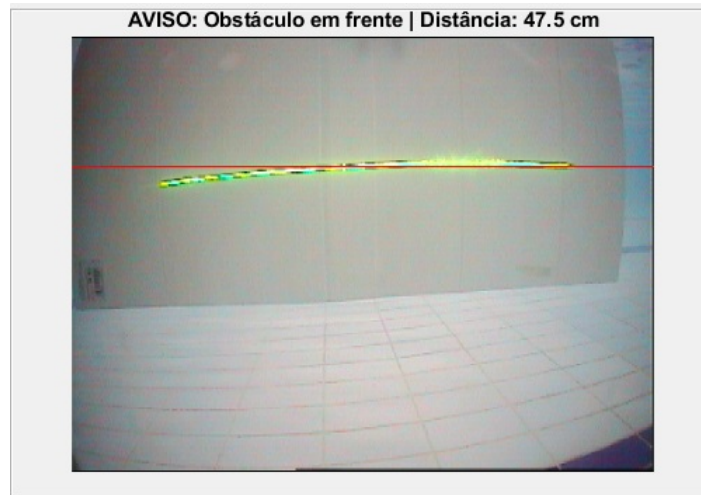
Dado que se pretende obter a distância em função do pixel de projecção, é necessário calcular a equação em ordem a  $f(y)$ . Resultando assim em:

$$Dist_{obst} = \left( \frac{Y - 355,7}{-4395} \right)^{\frac{1}{-1,153}} \quad (4.3)$$

### Resultados do desvio de obstáculos

Nesta fase, já é possível apresentar os resultados finais da navegação por um percurso pré-definido com a detecção e desvio de obstáculos que possam aparecer durante o caminho. São agora aplicadas as várias tecnologias exploradas anteriormente, levando assim ao objectivo final desta dissertação.

Foram realizados vários testes com a activação do percurso 1, com orientação constante. Aqui pretendia-se verificar se o veículo conseguia detectar um obstáculo artificial que foi colocado e fazer o desvio em tempo útil, voltando à trajectória original depois de contornar o obstáculo.



*Figura 4.8: Laser a incidir num obstáculo, debaixo de água.*

Analisando a Figura 4.8, podemos verificar que o ROV é capaz de detectar o obstáculo, sendo que para fins de experimentação, o veículo navegava a uma velocidade mais reduzida, cerca de 7 km/h. Foram realizadas várias sessões de testes, num total de 8 tentativas, das quais apenas 2 foram bem sucedidas na detecção atempada do obstáculo e consequente manobra de desvio. Este número reduzido de tentativas bem sucedidas deve-se essencialmente à lentidão do processamento de imagem em tempo real, por parte do MATLAB. Isto poderá acontecer devido à comunicação entre o MATLAB e o

*software*, já que este último é executado numa máquina virtual. Por consequência, existe um atraso entre a captação e o processamento da imagem onde é visível a linha laser. Assim, apesar de o veículo ter realizado correctamente a detecção e as manobras de desvio e reposicionamento para velocidades muito baixas, existe um claro desfasamento entre a captação e detecção da linha laser.

## 4.2 SISTEMA DE NAVEGAÇÃO

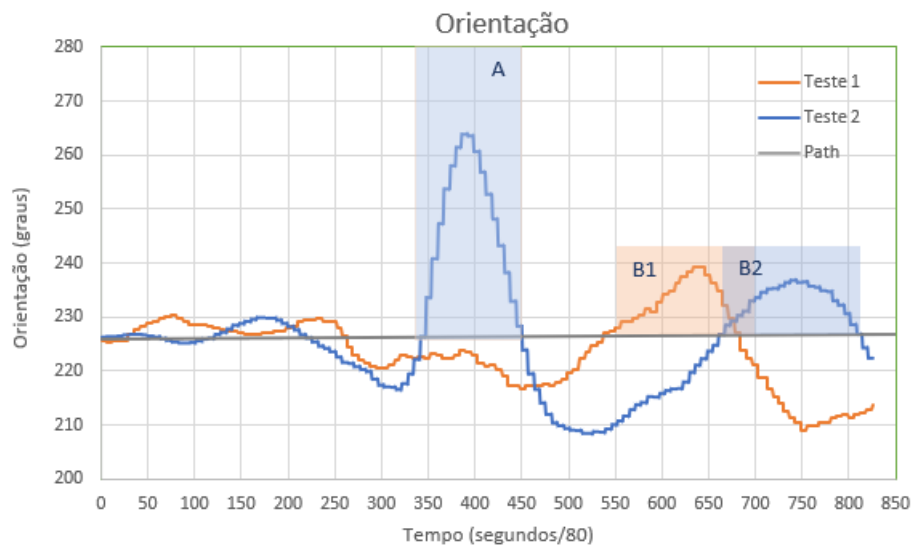
Nesta secção são apresentados os resultados dos testes de navegação realizados no local de testes.

### Caso 1: Navegação com orientação constante

Neste primeiro caso, são apresentados os resultados do teste da navegação com orientação pré-determinada, com o objectivo de verificar se o ROV mantém a trajectória definida. Na Figura 4.9 pode-se observar a trajectória realizada pelo ROV, em duas situações distintas, com e sem interferências externas. Na Tabela 4.2, temos uma amostra dos mais de 800 valores registados durante a trajectória do ROV para cada um dos testes.

*Tabela 4.2: Amostra de valores de heading.*

Heading 1	Heading 2	Tempo
226,20	225,50	1
226,20	225,50	2
226,20	225,50	3
226,20	225,50	4
226,20	225,50	5
226,30	225,40	6
226,30	225,40	7
226,30	225,40	8
226,30	225,40	9
226,30	225,40	10
226,30	225,40	11
226,30	225,50	12



*Figura 4.9: Orientação do veículo no percurso constante.*

No Teste 1, podemos observar a orientação do ROV durante a sua deslocação, este tem uma orientação inicial de 225 graus, que deverá ser seguida durante o seu percurso. Analisando a Figura 4.9, é possível perceber que o veículo realiza manobras de correcção de percurso, tendendo sempre para o valor inicial. Existe um desvio acentuado assinalado na figura pela área colorida B1, também presente no Teste 2, assinalado pela área colorida B2. Esta deslocação, que se verifica nos vários testes, deve-se à presença de anomalias magnéticas. Estas são causadas pelo material ferromagnético existente nas infraestruturas da piscina onde o ROV se desloca.

No Teste 2, é realizado o mesmo percurso, sendo que agora é introduzido um factor externo que pretende testar a resposta do ROV. Neste caso, durante a deslocação do ROV, através de um puxão no cabo umbilical, foi criada uma desorientação no ROV, que pode ser observada na Figura 4.9, na área colorida A. Posteriormente o ROV realiza manobras de correcção, sendo que consegue corrigir a sua trajectória com sucesso.

### **Caso 2: Navegação com mudança de direção**

Neste último teste, o objectivo é o ROV seguir um percurso pré-definido, que neste caso é uma trajectória quadrangular, onde se pretende que o ROV começando num ponto A, passe pelos pontos B, C e D, como ilustrado na Figura abaixo terminando, num teste ideal, na posição e orientação inicial, A.

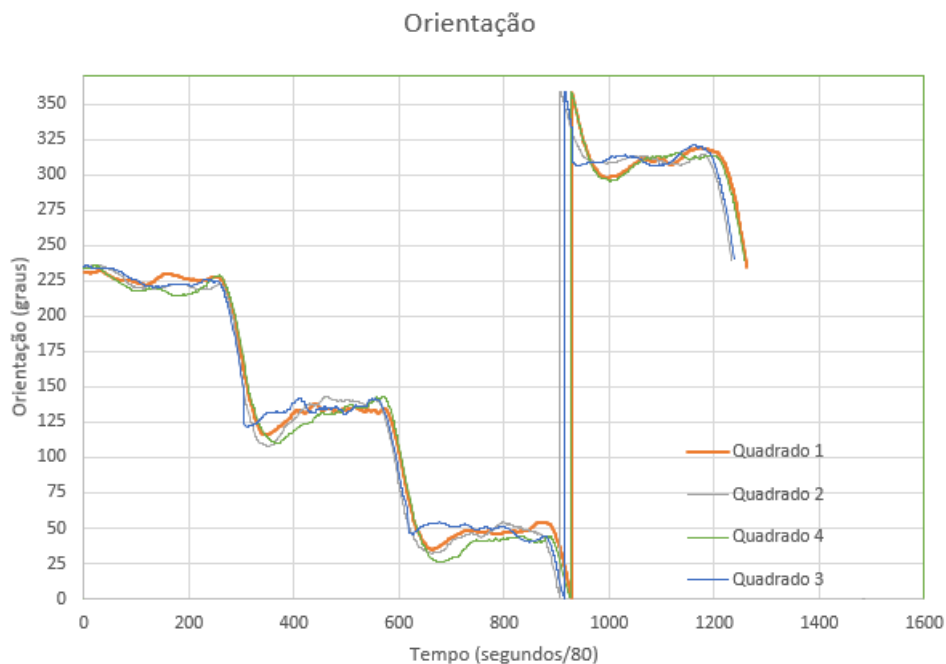


Figura 4.10: Gráfico da orientação na realização do percurso com mudança de direcção.

Analisando o Gráfico 4.10, podemos perceber que apesar de alguns desvios, mais uma vez provocados pelas anomalias magnéticas existentes na piscina, o veículo consegue realizar o trajecto definido, passando pelos 4 pontos definidos, voltando ao ponto inicial. Este percurso apresenta uma maior complexidade, já que envolve mudanças de direcção, e implica que o ROV ajuste a sua orientação consoante a fase de navegação em que se encontra. Foram recolhidos resultados de quatro testes, os quais estão representados na Figura 4.10. O objectivo foi começar os testes com o veículo sempre na mesma posição, sendo que existe uma diferença máxima de 5 graus entre as posições iniciais dos vários testes. Os resultados apresentam gráficos muito semelhantes, o que mostra um desempenho constante na realização do percurso pretendido. Na posição final de cada teste, existe uma diferença máxima de 5,6 graus, também derivada da diferença na posição inicial entre testes.

Estes resultados revelam-se bastante positivos, dado que o erro existente não é significativo. Não é possível observarmos o gráfico que ilustra a posição no plano cartesiano, devido à ausência de equipamento para o efeito. Através dos resultados anteriores, podemos afirmar que o ROV executa com sucesso percursos pré-definidos, sendo agora possível realizar testes mais complexos de forma a testar a resposta do veículo.

### 4.3 OUTROS CENÁRIOS DE APLICAÇÃO

O programa proposto aborda a detecção e desvio de obstáculos em ambientes estruturados, com o intuito de validar a aplicabilidade para cenários reais. Os gasodutos e oleodutos de empresas petrolíferas, destroços de navios e outros ambientes imprevisíveis instalados a grandes profundidades, são cenários onde os veículos subaquáticos como os ROVs ou AUVs são muito utilizados, nomeadamente em tarefas de inspecção.



## 4.4 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram realizadas algumas experiências de forma a validar o sistema desenvolvido com visão e laser.

Apesar do processo de calibração da câmara ser um passo importante, o foco desta dissertação incide sobre o sistema composto pela câmara e o laser que possibilitam a detecção de obstáculos.

Os resultados obtidos foram importantes, dado que se apresentou uma solução viável de baixo custo para detectar obstáculos em tempo real, o que permite assim dotar o veículo de controlos autónomos.



# CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

---

## 5.1 CONCLUSÕES

Nesta dissertação foram abordados vários aspectos em relação à navegação e às funcionalidades do VideoRay Pro 4, sendo apresentado um programa que permite ao ROV realizar alguns percursos pré-definidos de forma autónoma, detectando e desviando-se de obstáculos. A existência de inúmeras actividades possíveis em ambientes subaquáticos na área da robótica, faz com que a exploração e desenvolvimento destas tecnologias aumente de dia para dia. Deste modo, é previsível que vão aparecendo cada vez mais e melhores soluções para facilitar a navegação subaquática neste tipo de veículos.

Numa primeira fase, efectuou-se um estudo sobre as tecnologias existentes e que tipo de projectos foram desenvolvidos neste âmbito. Esta análise foi fulcral para entender qual a melhor abordagem a adoptar, sendo assim possível proceder ao planeamento da arquitectura do sistema de navegação e de visão, cumprindo assim o objectivo primário delineado. O processo de calibração é uma etapa fundamental em qualquer sistema de visão computacional, sendo que quanto mais precisa for a calibração, melhor será o desempenho do sistema e melhores são os resultados. Desse modo, a calibração da câmara foi fundamental para o desenvolvimento do trabalho.

Em relação ao sistema de navegação, foi essencial compreender a estrutura de funcionamento do veículo, algo que foi possível graças à documentação cedida pela VideoRay. Foi criado um sistema de raiz que permite o controlo total do veículo, seja em modo manual, com os controlos básicos de navegação, seja através de comandos que permitem executar percursos pré-definidos, permitindo a detecção de obstáculos. Uma vez que o ROV não fornece dados de localização geográfica, a navegação do mesmo é baseada na orientação em relação ao campo magnético terrestre, o que poderá ser problemático no caso de existirem perturbações magnéticas.

Os resultados do sistema de navegação com recurso a laser foram muito positivos, sendo já possível realizar tarefas reais com este sistema. A detecção de obstáculos e o cálculo da distância aos mesmo tem uma margem de erro muito baixa.

Para terminar, esta dissertação deu origem a uma publicação, cujo o título é "*Laser and Vision-based Obstacle Avoidance for a Semi-autonomous ROV*", submetida ao congresso "*Sensors & Actuators Congress (SAC) (2018)*".

## 5.2 TRABALHO FUTURO

Existem várias expectativas para trabalho futuro, seja em diferentes aplicações do sistema criado, seja na integração de novos sensores para dotar o ROV de funcionalidades adicionais que possam potenciar a sua utilização.

A abordagem de novas aplicações é sugerida na experimentação do ROV em ambientes não controlados, como num rio ou no mar, onde a visibilidade diminui drasticamente e o veículo está sujeito a factores adicionais. Estes testes permitem testar a robustez do veículo e do sistema implementado, quando está sujeito, por exemplo, a correntes e a obstáculos irregulares, como redes de pesca, rochas e outros. Estes testes são importantes para determinar o comportamento do programa de navegação e detecção de obstáculos, que devido à pouca visibilidade poderá não conseguir processar com precisão as imagens obtidas.

Por fim, a implementação de novos trajectos pré-definidos, assim como a melhoria do sistema de detecção e desvio de obstáculos são pontos interessantes que podem ser explorados. Após a consolidação dessa etapa é possível ter objectivos mais ambiciosos através da integração de novos sensores. O mais importante seria o sistema de posicionamento USBL que iria permitir saber a localização geográfica do veículo durante a realização dos testes e missões.

# BIBLIOGRAFIA

---

- [1] B. Cicin-Sain, D. Vanderzwaag e M. C. Balgos, *Routledge handbook of national and regional ocean policies*. Routledge, 2015.
- [2] G. Matsumoto e T. Potts, «Two ways of researching the underwater world», *Brooks/Cole Enrichment Module*, vol. 26, 2011.
- [3] C. Bell, M. Bayliss e R. Warburton, *Handbook for ROV Pilot/technicians*. Oilfield Publ. Limited, 1997.
- [4] (2018). VideoRay Pro 4 ROV, [Online] Disponível: <http://www.videoray.com/homepage/new/videoray-pro-4.html>.
- [5] N. J. Pioch, B. Roberts e D. Zeltzer, «A virtual environment for learning to pilot remotely operated vehicles», em *International Conference on Virtual Systems and MultiMedia*, set. de 1997, pp. 218–226. DOI: 10.1109/VSMM.1997.622350.
- [6] L. Jin, X. Xu, S. Negahdaripour, C. Tsukamoto e J. Yuh, «A real-time vision-based stationkeeping system for underwater robotics applications», em *OCEANS 96 MTS/IEEE Conference Proceedings. The Coastal Ocean - Prospects for the 21st Century*, vol. 3, set. de 1996, 1076–1081 vol.3. DOI: 10.1109/OCEANS.1996.569051.
- [7] R. L. Marks, H. H. Wang, M. J. Lee e S. M. Rock, «Automatic visual station keeping of an underwater robot», em *OCEANS '94. 'Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation.' Proceedings*, vol. 2, set. de 1994, II/137–II/142 vol.2. DOI: 10.1109/OCEANS.1994.364029.
- [8] S. Bennett, «A brief history of automatic control», *IEEE Control Systems*, vol. 16, n.º 3, pp. 17–25, jun. de 1996, ISSN: 1066-033X. DOI: 10.1109/37.506394.
- [9] T. I. Fossen, *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. John Wiley & Sons, 2011.
- [10] A. Lekkas, «Guidance and Path-Planning Systems for Autonomous Vehicles», tese de doutoramento, Norwegian University of Science e Technology, abr. de 2014.
- [11] F. Aghili, «A Prediction and Motion-Planning Scheme for Visually Guided Robotic Capturing of Free-Floating Tumbling Objects With Uncertain Dynamics», *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 28, n.º 3, pp. 634–649, jun. de 2012, ISSN: 1552-3098. DOI: 10.1109/TR0.2011.2179581.
- [12] S. Blouin, G. J. Heard e S. Pecknold, «Autonomy and networking challenges of future underwater systems», em *2015 IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, mai. de 2015, pp. 1514–1519. DOI: 10.1109/CCECE.2015.7129505.
- [13] A. J. Sorensen, *Marine control systems propulsion and motion control of ships and ocean structures*. Citeseer, 2012.

- [14] M. Caccia, «Vision-based ROV horizontal motion control: Experimental results», *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 37, n.º 10, pp. 397–402, 2004.
- [15] J. H. Rife e S. M. Rock, «Design and Validation of a Robotic Control Law for Observation of Deep-Ocean Jellyfish», *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 22, n.º 2, pp. 282–291, abr. de 2006, ISSN: 1552-3098. DOI: 10.1109/TR0.2005.862484.
- [16] Y. Fan e A. Balasuriya, «Autonomous target tracking by AUVs using dynamic vision», em *Proceedings of the 2000 International Symposium on Underwater Technology (Cat. No.00EX418)*, 2000, pp. 187–192. DOI: 10.1109/UT.2000.852539.
- [17] J. A. Catipovic, «Performance limitations in underwater acoustic telemetry», *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 15, n.º 3, pp. 205–216, jul. de 1990, ISSN: 0364-9059. DOI: 10.1109/48.107149.
- [18] R. Takimoto, «Computer Vision Techniques applied to the Depth Displacement of an AUV near the Free Surface», tese de doutoramento, Department of Systems Design for Ocean-Space Yokohama National University Japan, 2006.
- [19] M. Watson, C. Agh e B. Kim, «In-situ acoustic calibration technique for range and bearing arrays», em *Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE*, set. de 2005, 2078–2083 Vol. 3. DOI: 10.1109/OCEANS.2005.1640066.
- [20] J. Trabuco e R. Tavares, «Desenvolvimento de um Sistema de Navegação para um Veículo Autónomo Submarino», *Trabalho Final de Curso apresentado ao Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa*, 2000.
- [21] H. Kondo, T. Ura, Y. Nose, J. Akizono e H. Sakai, «Visual investigation of underwater structures by the AUV and sea trials», em *Oceans 2003. Celebrating the Past ... Teaming Toward the Future (IEEE Cat. No.03CH37492)*, vol. 1, set. de 2003, 340–345 Vol.1. DOI: 10.1109/OCEANS.2003.178581.
- [22] A. Ortiz, M. Simo e G. Oliver, «Image sequence analysis for real-time underwater cable tracking», em *Proceedings Fifth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*, 2000, pp. 230–236. DOI: 10.1109/WACV.2000.895427.
- [23] J. Horgan e D. Toal, «Vision systems in the control of autonomous underwater vehicles», em *7th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft (MCMC 2006)*, 2006.
- [24] G. C. Karras, D. J. Panagou e K. J. Kyriakopoulos, «Target-referenced Localization of an Underwater Vehicle using a Laser-based Vision System», em *OCEANS 2006*, set. de 2006, pp. 1–6.
- [25] X. Xu e S. Negahdaripour, «Vision-based motion sensing for underwater navigation and mosaicing of ocean floor images», em *OCEANS '97. MTS/IEEE Conference Proceedings*, vol. 2, out. de 1997, 1412–1417 vol.2. DOI: 10.1109/OCEANS.1997.624204.
- [26] Z. Zhang, «Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations», em *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, vol. 1, 1999, 666–673 vol.1. DOI: 10.1109/ICCV.1999.791289.
- [27] G. H. Fischer, «On the existence and uniqueness of maximum-likelihood estimates in the Rasch model», *Psychometrika*, vol. 46, n.º 1, pp. 59–77, 1981.
- [28] F. Zhou e G. Zhang, «Complete calibration of a structured light stripe vision sensor through planar target of unknown orientations», *Image and Vision Computing*, vol. 23, n.º 1, pp. 59–67, 2005.
- [29] Q. Zhang e R. Pless, «Extrinsic calibration of a camera and laser range finder (improves camera calibration)», em *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots*

- and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566), vol. 3, set. de 2004, 2301–2306 vol.3. DOI: 10.1109/IROS.2004.1389752.
- [30] Y. Dong, X. Ye e X. He, «A novel camera calibration method combined with calibration toolbox and genetic algorithm», em *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2016 IEEE 11th Conference on*, IEEE, 2016, pp. 1416–1420.
  - [31] V. S. Bagnato, «O Magnífico Laser», *Ciência Hoje*, vol. 37, p. 31, 2005.
  - [32] A. Pontes. (mar. de 2008). Tecnologia nacional leva inovação ao setor de navegação marítima, [Online] Disponível: <http://www.faperj.br/?id=1104.2.7>.
  - [33] Y. Chen, K. Yang, X. Zhang, M. Xia e W. Li, «Modelling of beam propagation and its applications for underwater imaging», *Frontiers of Optoelectronics in China*, vol. 4, n.º 4, pp. 398–406, 2011.
  - [34] R. Schettini e S. Corchs, «Underwater Image Processing: State of the Art of Restoration and Image Enhancement Methods», *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2010, jan. de 2010.
  - [35] C.-J. L. Hsin-Hung Chen, «A simple underwater video system for laser tracking», em *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37158)*, vol. 3, 2000, 1543–1548 vol.3. DOI: 10.1109/OCEANS.2000.882160.
  - [36] C. Cain e A. Leonessa, «Laser based rangefinder for underwater applications», em *2012 American Control Conference (ACC)*, jun. de 2012, pp. 6190–6195. DOI: 10.1109/ACC.2012.6315182.
  - [37] C. Cain e A. Leonessa, «Validation of underwater sensor package using feature based SLAM», *Sensors*, vol. 16, n.º 3, p. 380, 2016.
  - [38] S. Tetlow, S. Creaven, E. Jones e D. Reid, «Laser stripe imaging to determine three-dimensional information on fish shoals», *Underwater Technology*, vol. 26, n.º 1, pp. 19–25, 2004.
  - [39] N. Chotiros, M. Isakson, J. Piper e M. Zampolli, «Seafloor roughness measurement from a ROV», em *Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies, 2007. Symposium on*, IEEE, 2007, pp. 52–57.
  - [40] A. Hanai, S. K. Choi e J. Yuh, «A new approach to a laser ranger for underwater robots», em *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No.03CH37453)*, vol. 1, out. de 2003, 824–829 vol.1. DOI: 10.1109/IROS.2003.1250731.
  - [41] (2018). Single Camera Calibrator App, [Online] Disponível: <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/single-camera-calibrator-app.html>.
  - [42] Z. Zhang, «A flexible new technique for camera calibration», *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, n.º 11, pp. 1330–1334, nov. de 2000, ISSN: 0162-8828. DOI: 10.1109/34.888718.
  - [43] J. Heikkila e O. Silven, «A four-step camera calibration procedure with implicit image correction», em *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, jun. de 1997, pp. 1106–1112. DOI: 10.1109/CVPR.1997.609468.